

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mislav Asodi

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

Student:

Mislav Asodi

Zagreb, 2011.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Mislav Asodi



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum: 05-07-2011 Prilog
Klasa: 602-04/11-6/7
Ur.broj: 15-1703-11-258

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MISLAV ASODI** Mat. br.: 0178046247

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA MALE HIDROELEKTRANE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF SMALL HYDRO POWER PLANT**

Opis zadatka:

S ciljem smanjenja emisije CO₂, proizvodnja tzv. zelene električne energije iz obnovljivih energetskih izvora postaje sve značajnija. Doprinos tome mogu dati i male hidroelektrane. U pojedinim županijama Republike Hrvatske postoje određeni potencijali vodotokova za instaliranje malih hidroelektrana. Da bi se za neku lokaciju odabralo optimalno postrojenje i ustanovilo vrijeme njegove amortizacije, te provjerilo da li je uoče ekonomski isplativo potrebno je provesti preliminarnu tehno-ekonomsku analizu. Danas na tržištu postoje raspoloživi računalni programi (alati) pomoću kojih je moguće provesti na temelju potrebnih ulaznih podataka tehno-ekonomsku analizu male hidroelektrane za odabranu lokaciju. Takovi programi značajno pomažu donositeljima odluka u lokalnoj upravi i potencijalnim investitorima.

U okviru završnog zadatka potrebno je:

- 1) dati opis mogućih shema malih hidroelektrana kao i njihovih osnovnih komponenti;
- 2) prikazati osnovne elemente tehno-ekonomske analize;
- 3) predstaviti dostupne alate na tržištu za tehno-ekonomsku analizu malih hidroelektrana;
- 4) pomoću odabranog alata provesti tehno-ekonomsku analizu male hidroelektrane za odabranu lokaciju na području brodsko-posavske županije.

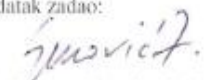
U radu treba navesti korištenu literaturu kao i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
18. studenog 2010.

Rok predaje rada:
1. rok: 04. veljače 2011.
2. rok: 05. srpnja 2011.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 09. – 11. veljače 2011.
2. rok: 11. – 13. srpnja 2011.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Dubravko Majetić

Polimada, za diplomsko i završno ispit

Obilježje: 15-1703-11-258

1. Sadržaj

1. Sadržaj.....	5
2. Popis slika	6
3. Popis tablica	7
4. Popis oznaka.....	8
5. Sažetak	9
6. Uvod	10
7. Definicija male hidroelektrane, glavne komponente i osnovne sheme postrojenja	11
7.1. Glavne komponente male hidroelektane	13
7.1.1. Građevinski objekti	13
7.1.1.1. Brana	13
7.1.1.2. Ulazni uređaj [zahvat]	14
7.1.1.3. Dovodni kanal	15
7.1.1.4. Tlačni cjevovod	15
7.1.1.5. Strojarnica.....	16
7.1.1.6. Odvodni kanal	16
7.1.2. Hidromehanička oprema	16
7.1.2.1. Pomični organi na brani	16
7.1.2.2. Elementi vodozahvata.....	17
7.1.2.3. Izlazni elementi iz turbine	17
7.1.3. Elektrostrojarska oprema.....	18
7.1.3.1. Turbine	18
7.1.3.2. Multiplikatori	27
7.1.3.3. Generatori	28
7.1.3.4. Transformatori	29
7.1.3.5. Automatsko upravljanje.....	29
8. Alati za izradu tehno-ekonomske analize lokacija predviđenih za izgradnju male hidroelektrane.....	30
8.1. Preliminarna analiza izvodljivosti za malu hidroelektranu “Lužani”	32
8.2. Računalni alati za izradu tehno-ekonomske analize.....	46
8.2.1. Izrada tehno-ekonomske analize pomoću programa Smart Mini-Idro	50
9. Inovacije u konstrukciji malih hidroelektrana.....	61
9.1. VLH turbine	61
10. Zaključak.....	63
11. Literatura	64

2. Popis slika

Slika 1.	Shema protočne hidroelektrane	13
Slika 2.	Izgled brane	14
Slika 3.	Pomični organi na brani	17
Slika 4.	Ugrađeni difuzor na izlazu iz turbine	18
Slika 5.	Reakcijska turbina	19
Slika 6.	Akcijska turbina	19
Slika 7.	Propelerna turbina	20
Slika 8.	Francis turbina.....	20
Slika 9.	Pelton turbina	20
Slika 10.	Tipovi turbina.....	21
Slika 11.	Shema Francis turbine.....	22
Slika 12.	Shema Kaplan turbine	22
Slika 13.	Shema Pelton turbine	23
Slika 14.	Shema Turgo turbine.....	23
Slika 15.	Shema Crossflow turbine	24
Slika 16.	Dijagram područja primjene određenog tipa turbine.....	25
Slika 17.	Dijagram učinkovitosti vodnih turbina.....	26
Slika 18.	Shema multiplikatora	27
Slika 19.	Shema generatora sa turbinom	28
Slika 20.	Satelitska snimka mikrolokacije.....	34
Slika 21.	Izgled brane na lokaciji	35
Slika 22.	Shema postrojenja sa Kaplan turbinom.....	36
Slika 23.	Prikaz postrojenja sa ugrađenom DIVE turbinom.....	37
Slika 24.	Krivulja trajanja protoka	38
Slika 25.	Energetske karakteristike postrojenja.....	42
Slika 26.	Izgled programa Vapidro-Aste.....	48
Slika 27.	Prikaz GIS karte za područje Italije	48
Slika 28.	Izgled glavnog izbornika programa Smart Mini-Idro	50
Slika 29.	Proračun krivulje trajanja protoka.....	51
Slika 30.	Proračun biološkog minimuma vode.....	51
Slika 31.	Proračun iskoristivog protoka	52
Slika 32.	Proračun protoka kroz turbinu.....	53
Slika 33.	Krivulje iskoristivosti	54
Slika 34.	Proračun neto pada u zavisnosti o instaliranom protoku kroz turbinu	55
Slika 35.	Odabir tipa turbine i prikaz krivulje učinkovitosti turbine.....	56
Slika 36.	Proračun maksimalne, nominalne i prosječne snage elektrane	57
Slika 37.	Dijagram trajanja protoka i snage za instalirani protok.....	59
Slika 38.	Prikaz procenjenih troškova	60
Slika 39.	Shema vertikalne Kaplan turbine	61
Slika 40.	Dijagram povećanja volumena i promjera	62

3. Popis tablica

Tablica 1. Tipovi turbina za određeni pad.....	26
--	----

4. Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
c_p	HRK/kW	koeficijent snage
c_E	HRK/kWhgod	koeficijent energije
c_h	h	koeficijent isplativosti
τ	god	vrijeme povrata investicije
$P[t]$	W	snaga
$Q_{DER} [t]$	m^3/s	instalirani protok krot turbinu
H_n	m	geodetska neto visina
η_{TUR}	-	koeficijent učinkovitosti turbine
γ	N/m^3	specifična težina vode
E_{ANNUAL}	MWh	godišnja proizvodnja električne energije
η_{TOT}	-	ukupni koeficijent učinkovitosti

5. Sažetak

U radu je opisan postupak izrade preliminarne tehno-ekonomske analize u svrhu izgradnje male hidroelektrane na odabranoj lokaciji na području brodsko-posavske županije. Ukratko je opisana potreba za proizvodnjom električne energije iz obnovljivih izvora energije te su predstavljeni standardni tipovi malih hidroelektrana kao i njihove glavne komponente. Prikazani su osnovni elementi tehno-ekonomske analize i predstavljeni su računalni alati za izradu tehno-ekonomske analize dostupni na tržištu. Izrađena je tehno-ekonomska analiza odabrane lokacije na osnovu prikupljenih podataka o srednjim dnevnim protocima i geodetskom padu na lokaciji te je ista izrađena i koristeći računalni program Smart mini-idro, predstavljen u programu S.M.A.R.T, čiji partner je i FSB. Na kraju je predstavljen i inovativni koncept VLH turbina, prilagođenim instalaciji na lokacijama sa malim geodetskim padom.

6. Uvod

Nakon konferencije Ujedinjenih naroda 1992. godine u Rio de Janeiru, Europska Unija se obvezala da će stabilizirati emisiju ugljičnog dioksida [CO_2], koji najviše pridonosi stvaranju efekta staklenika u atmosferi. Također je donešen zaključak da taj cilj neće biti ostvariv bez značajnog promicanja energetske učinkovitosti i velikih ulaganja u obnovljive izvore energije. Cilj je bio udvostučiti trenutnu proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije [1992.g.] do 2010. godine.

Od početka proizvodnje električne energije, hidroelektrane su bile, te su i danas na prvom mjestu obnovljivih izvora za proizvodnju električne energije. I velike i male hidroelektrane predstavljaju 13% od ukupno proizvedene električne energije. I dok konvencijalne, velike hidroelektrane zahtijevaju plavljenje velikih površina zemljišta s ozbiljnim ekološkim posljedicama i velikim gospodarskim troškovima, dobro dizajnirane male hidroelektrane [manje od 10 MW instalirane snage], lako se integriraju u lokalne eko-sustave. Male hidroelektrane daju najveći doprinos u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora energije i na europskoj i na svjetskoj razini. Na svjetskoj razini procjenjuje se da je instalirani kapacitet 1992. god bio 47.000 MW dok se ukupni potencijal procjenjuje na kapacitet od 180.000 MW, a u Europi se procjenjuje da instalirani kapacitet iznosi 9.500 MW te je do 2010. godine cilj bio udvostučiti kapacitet. Danas se i u RH počela sve više promovirati energetska učinkovitost te se potiču projekti za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije. Tako je do sada u registru obnovljivih izvora energije koji vodi Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva Republike Hrvatske prijavljen 91 projekt izgradnje malih hidroelektrana na vodotocima u Republici Hrvatskoj.

7. Definicija male hidroelektrane, glavne komponente i osnovne sheme postrojenja

Odlukom Vlade RH u ožujku 1997. god. pokrenuti su nacionalni energetske programi energetske efikasnosti i korištenja energije obnovljivih izvora. Jedan od njih je i Nacionalni energetski program izgradnje malih hidroelektrana [Program MAHE], kojem je temeljni cilj omogućavanje svih uvjeta za povećanu izgradnju malih hidroelektrana u RH.

Temeljni parametar na osnovi kojeg je definirana mala hidroelektrana u svim zemljama je instalirana snaga. U svijetu se malim hidroelektranama smatraju hidroelektrane u rasponu od donje granice instalirane snage od 5 kW [NR Kina], do gornje granice 30 MW [SAD].

U RH je utvrđena donja granica od 10 kW dok je gornja granica utvrđena na 10000 kW.

Pod glavnim komponentama male hidroelektrane podrazumijevaju se sljedeće glavne strukture i uređaji:

- Građevinski objekti
- Hidromehanička oprema
- Elektrostrojarska oprema
- Priključak na dalekovodnu mrežu

Cilj male hidroelektrane je pretvoriti potencijalnu energiju nekog vodotoka sa određenim geodetskim padom u električnu energiju.

Snaga svake male hidroelektrane je proporcionalna protoku [količini vode koja se dovodi turbini] i geodetskom padu između gornje površine vodotoka [gdje se voda uzima] i donje površine vodotoka [na izlaznom kanalu zahvata].

Prema geodetskom padu male hidroelektrane se mogu svrstati u tri kategorije:

- Visoki pad: 100 m i više
- Srednji pad: 30-100 m
- Niski pad: 2-30 m

A na osnovu konfiguracije mikrolokacije i samog vodotoka dijele se na:

- Run-off-river schemes [protočne elektrane]
- Postrojenja sa strojarnicom u podnožju brane
- Postrojenja integrirana u kanal za navodnjavanje
- Postrojenja integrirana u sklopu vodozahvata

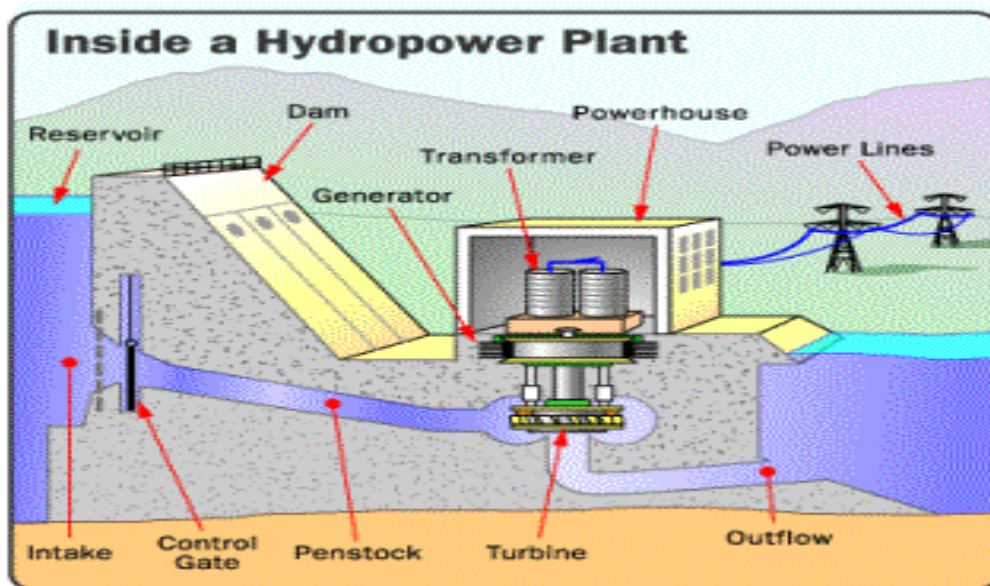
Izbor tipa hidroelektrane ovisi u prvom redu o morfološkim karakteristikama pozicije [zbog potrebe ostvarivanja što je moguće većeg geodetskog pada uz minimaliziranje cijene građevinskih a i drugih radova], urbanističkim zahtjevima, ekološkim zahtjevima i dr.

Budući da instalirani kapacitet hidroelektrane ovisi o padu i instaliranom protoku, zavisnost dimenzija dijelova postrojenja može se definirati izravno u odnosu prema padu i instaliranom protoku. To je prvi princip kojim se treba rukovoditi kod utvrđivanja dimenzija i tipizacije objekata i opreme za male hidroelektrane.

Strojarnica hidroelektrane može se smjestiti uz samu branu [zahvat vode] ili na neko mjesto dalje. Prema poziciji strojarnice u odnosu na branu, hidroelektrane se dijele na:

- Pribranske
- Derivacijske s otvorenim kanalom
- Derivacijske sa zatvorenim kanalom
- S tlačnim cjevovodom

7.1. Glavne komponente male hidroelektane



Slika 1. Shema protočne hidroelektrane

7.1.1. Građevinski objekti

7.1.1.1. Brana

Branom [Slika 2Error! Reference source not found.] se usporuje vodna razina i omogućuje nesmetano zahvaćanje potrebne količine vode za rad hidroelektrane. Premda je naziv objekta u širem smislu brana, u ovom slučaju pogodniji naziv je niski preljevni prag. Brana može biti nepokretna i pokretna. Osnovna zadaća brane je stvaranje ili povećavanje već postojećeg geodetskog pada, poglavito u ravninskim vodotocima gdje se geodetski pad ostvaruje upravo izgradnjom brane.

Visinu preljevnog praga određuje uglavnom morfologija vodotoka, te infrastrukturni objekti u zoni utjecaja uspora, jer plavljenje, odnosno rekonstrukcija infrastrukturnih objekata [ceste, mostovi, zgrade i sl.] u pravilu kod malih hidroelektrana ne dolazi u obzir. U slučaju malih hidroelektrana izgradnja brane obično ne dolazi u obzir zbog visokih troškova izgradnje što na kraju rezultira neisplativošću projekta. Zbog toga se poglavito u ravninskim vodotocima traže lokacije na kojima već postoji brana, dali zbog usporavanja vodotoka, stvaranja vodnog rezervoara ili zbog regulacije poplava jer se na takvim lokacijama vrlo lako može integrirati postrojenje male hidroelektrane [npr. u podnožju same brane].

Geodetski pad se može i povećati dogradnjom postojeće brane sa tzv.vrećastom branom, ispunjenom vodom ili komprimiranim zrakom.



Slika 2. Izgled brane

7.1.1.2. Ulazni uređaj [zahvat]

Ulazni uređaj je građevina kojom se zahvaća potrebna količina vode i dovodi do strojarnice. Postoje dva tipa ulaznih uređaja: bočni ulazni uređaj i tirolski zahvat.

Bočnim ulaznim uređajem branom usporena voda zahvaća se bočno, građevinom dimenzioniranom na instalirani protok. Ispred zahvata je prag, kojim se sprečava ulaženje vučenog nanosa u dovodnu građevinu male hidroelektrane, a na ulazu u dovod je čelična rešetka, koja štiti dovod od plivajućih predmeta.

Tirolski zahvat je pogodan za brdske nepristupačne lokacije, jer ne traži gotovo nikakvo održavanje, a siguran je u pogonu. Pravilnim izborom dimenzija uzima onoliko vode koliko je potrebno za rad hidroelektrane, nesmetano propušta velike vode, te plivajuće predmete i krupan nanos, a svojom malom visinom i mogućnošću dobrog uklapanja u teren minimalno narušava izgled okoline. Uz tirolski zahvat izvodi se i taložnica-pjeskolov za taloženje sitnog nanosa koji uđe u zahvat. Obično se tirolski zahvat sastoji od niske betonske pregrade, unutar

koje se, okomito na smjer toka vode, nalazi kanal, dimenzioniran na instalirani protok male hidroelektrane, pokriven rešetkom nagnutom u smjeru toka vode. Spomenutim kanalom odvodi se zahvaćena voda u taložnicu, a zatim u dovodnu građevinu.

7.1.1.3. Dovodni kanal

Zadatak dovodnog kanala je dovesti vodu do tlačnog cjevovoda, ulaza na turbinu ili strojarnice, sa što manje gubitaka na padu. Na obroncima jače nagnutih terena i za relativno manje instalirane protoke dolazi u obzir armiranobetonski kanal pravokutnog poprečnog presjeka s tečenjem sa slobodnim vodnim licem. Kanal je pokriven montažnim pločama, jer je na strmim obroncima izložen obrušavanju zemljanog i kamenog materijala. Gornji rub kanala treba biti horizontalan, jer se kod mirovanja turbine uspostavlja statička razina vode u kanalu. Kod vodotoka sa malim uzdužnim padom i većim instaliranim protokom predviđa se otvoreni kanal trapeznog poprečnog presjeka, obložen slojem betona sa tečenjem sa slobodnim vodnim licem. Budući da se i ovdje kod zatvaranja privodnog kola turbine u kanalu uspostavlja horizontalna statička razina, potrebni su nasipi s horizontalnom krunom.

7.1.1.4. Tlačni cjevovod

Kod srednjetačnih i visokotlačnih malih hidroelektrana voda se do turbine dovodi tlačnim cjevovodima. Ukoliko je cjevovod većeg promjera ili/i veće dužine, zbog opasnosti od tlačnog udara, ispred turbine se ugrađuje vodna [kompenzacijska] komora. Izvode se kao:

- Otvoreno položeni
- Slobodno položeni u rovu
- Položeni u jarku i zatrpani zemljom iz iskopa

Ovisno o veličini instaliranog protoka, promjer im se kreće od 0.4 m do 2.8 m.

7.1.1.5. *Strojarnica*

Male hidroelektrane su postrojenja kod kojih je rad automatiziran do te mjere da uz zadovoljavajuću sigurnost rade bez posade, samo uz povremeni nadzor. Ne postoji potreba za prostorijama za osoblje te se korisna površina strojarnice može svesti na najnužniju mjeru. Danas se proizvode i turbine sa integriranim generatorom te su dimenzije zahvata i opreme znatno manje pa je i sama površina strojarnice smanjena, te se u današnje vrijeme kod malih hidroelektrana strojarnice pretvaraju u potpuno automatizirane upravljačke stanice.

7.1.1.6. *Odvodni kanal*

U većini slučajeva strojarnica male hidroelektrane smještena je uz sam vodotok. Tada je odvodni kanal vrlo kratak, betoniran, pravokutnog poprečnog presjeka, u usponu 1/4 prema koritu vodotoka, a bokovi mu se šire pod malim kutom.

7.1.2. Hidromehanička oprema

7.1.2.1. *Pomični organi na brani*

Funkcija pomičnih organa na brani Slika 3 jest regulacija razine gornje vode. U ovu grupu spadaju razne preljevne zaklopke, gredne zapornice na branam, razni segmentni zatvarači, kao i njihove međusobne kombinacije. U novije se vrijeme kod regulacije gornje vode koriste i gumene nadbrane, koje se mogu ispuniti komprimiranim zrakom ili vodom pod malim pritlakom.



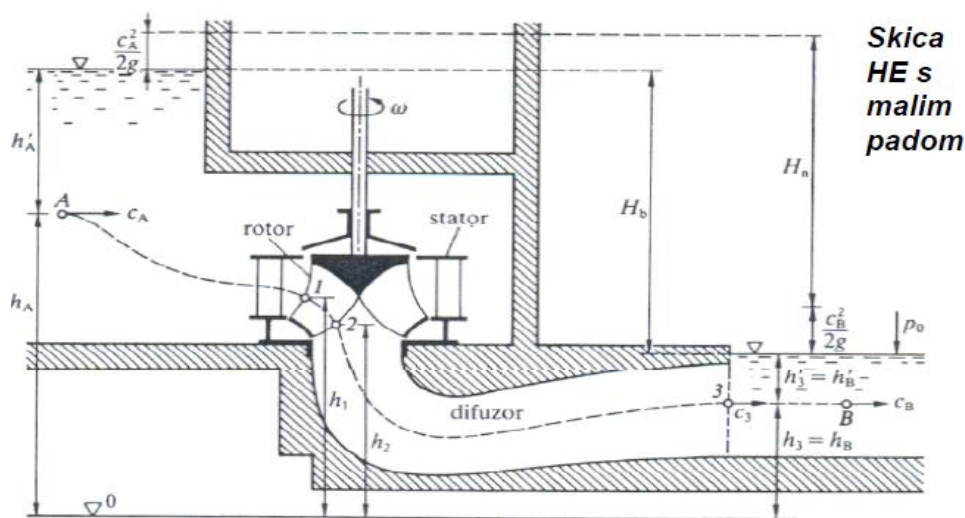
Slika 3. Pomični organi na brani

7.1.2.2. Elementi vodozahvata

Elementi vodozahvata su: zapornice i zaporni organi, grube i fine rešetke i elementi za čišćenje rešetaka. Zapornice služe za povremeno ispuštanje vode iz vodnih prostora strujnih dijelova male hidroelektrane. Za male raspone protočnih polja izrađuju se iz okovane hrastovine, a za velike raspone i dubine iz zavarenih čeličnih elemenata. Klizne staze zapornica u pravilu su iz čeličnih profila. Grube i fine rešetke služe za zaustavljanje većih mehaničkih onečišćenja rijeke [stabla, veliko kamenje i sl.]. Čiste se povremeno mehaničkim putem. Fine rešetke zaustavljaju manje nečistoće rijeke poput boca, plastičnih vrećica, manjeg kamenja i sl. Zbog manjeg otvora ovih rešetki češća su začepljenja, pa su time povećani i hidraulički gubici. Zbog toga se čiste automatiziranim strojevima za čišćenje. Zbog jake korozije kojoj su izložene, u novije se vrijeme pocinčavaju.

7.1.2.3. Izlazni elementi iz turbine

Kako bi se smanjili gubici zbog vrtloženja vode na izlazu iz turbine se postavljaju difuzori [slika 4].



Slika 4. Ugrađeni difuzor na izlazu iz turbine

7.1.3. Elektrostrojarska oprema

7.1.3.1. Turbine

Funkcija turbine je transformacija kinetičke energije vode u mehaničku energiju rotirajućih dijelova turbine tj. lopatica. Postoji puno različitih tipova turbina kako bi se pokrio širok raspon uvjeta koji proizlaze iz konfiguracije terena odnosno različitih kombinacija protoka i pada. Kod većine lokacija malih protočnih hidroelektrana kod kojih protoci variraju značajno, obično se odabiru one turbine koje efikasno rade u širokim granicama protoka [npr. Kaplan, Pelton, Turgo, Crossflow].

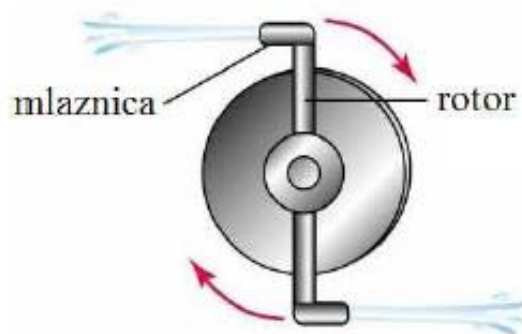
Izbor tipa, oblika i dimenzija turbine prvenstveno ovisi o neto padu, instaliranom protoku, brzini vrtnje koja određuje tip i osnovni oblik rotora turbine i ostalih dijelova, brzini pobjega [najveća brzina koja se može postići bez priključenog električnog opterećenja] i troškovima izgradnje male hidroelektrane.

Male vodne turbine mogu postići učinkovitost od 90%.

Klasifikacija turbina:

Reakcijske turbine [Slika 5]: snaga proizlazi iz pada tlaka na turbini, potpuno su uronjene u vodu, obodna brzina se pretvara u snagu osovine, u ovu skupinu spadaju: Propelerna, Francisova i Kaplanova turbina.

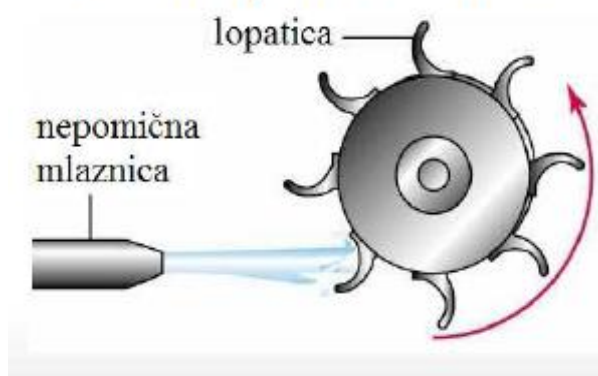
■ Reakcijske turbine



Slika 5. Reakcijska turbina

Aksijske turbine [impulsne] [Slika 6]: Pretvaraju kinetičku energiju vode u električnu tako da vode pokreće lopatice turbine. Kod ovih turbina nema pada tlakova na turbini, u ovu skupinu spadaju Peltonove, Turgo i Crossflow turbine.

■ Aksijske turbine



Slika 6. Aksijska turbina

3 su osnovne kategorije konvencijalnih turbina:

Kaplan i propelerna turbina [Slika 7]: to su reakcijske turbine s aksijalnim protokom koje se koriste za male padove.



Slika 7. Propelerna turbina

Francis turbina [Slika 8]: reakcijska turbina radijalnog protoka s fiksnim lopaticama rotora i podesivim vodilicama lopatica koja se koristi za srednje padove.



Slika 8. Francis turbina

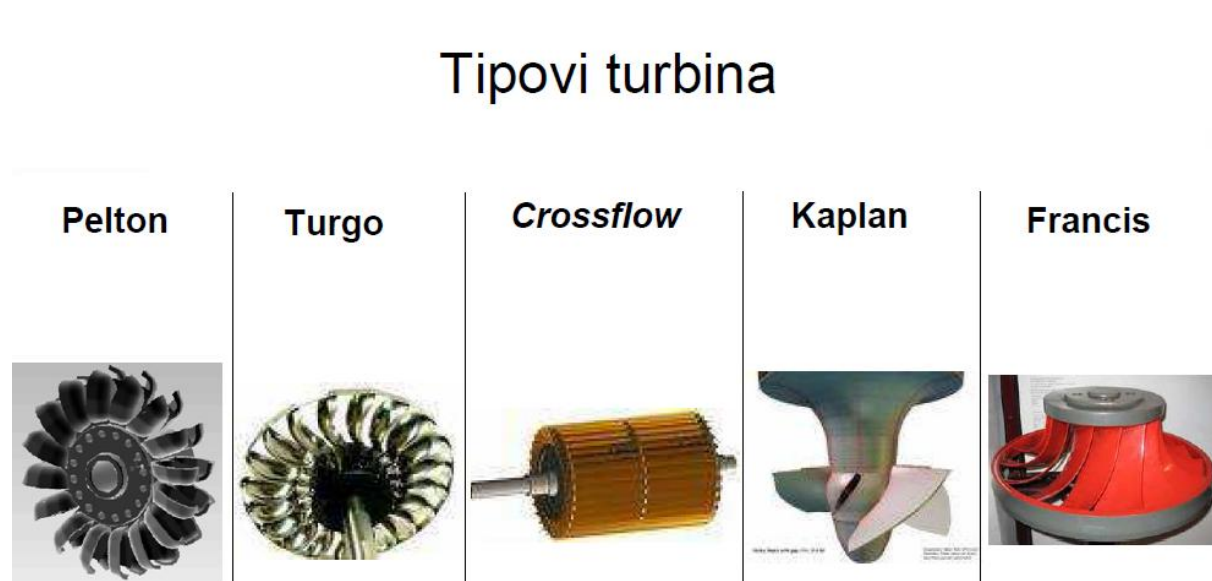
Pelton turbina [Slika 9]: ovo je akcijska turbina sa jednom ili više mlaznica, a svaka mlaznica osigurava kontrolu protoka kroz prskalicu s iglom. Koristi se za srednje i velike padove.



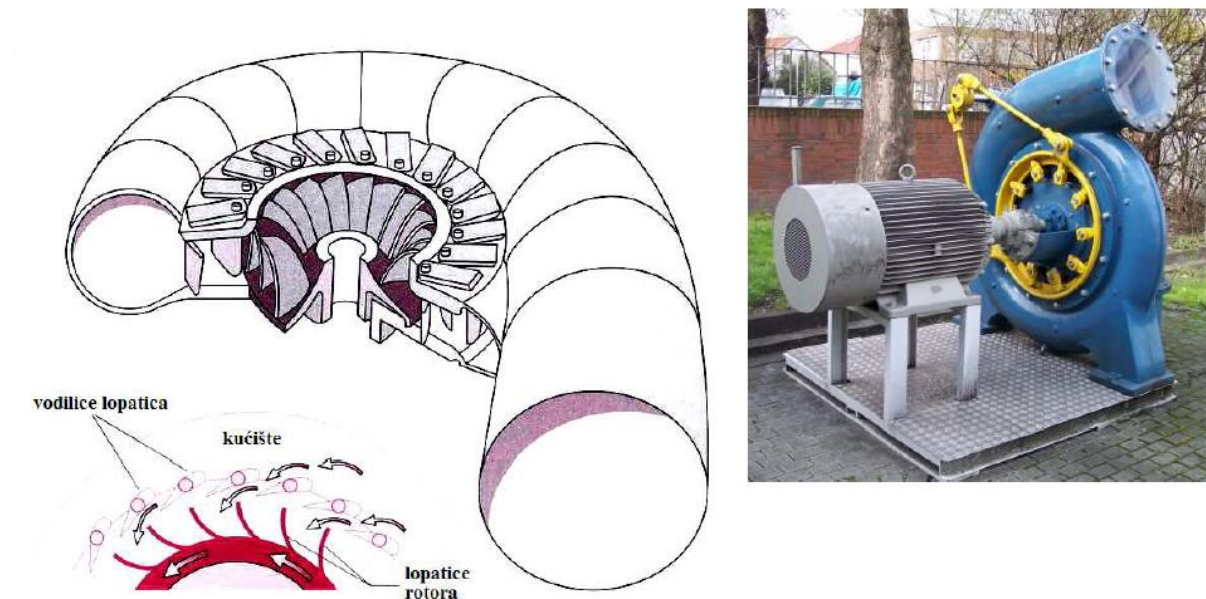
Slika 9. Pelton turbina

Tipovi turbina[Slika 10]:

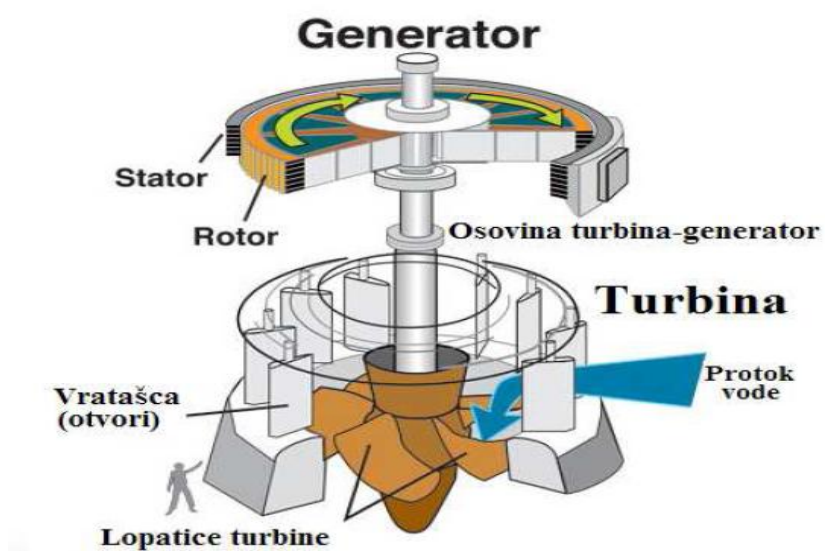
- Francis turbina
- Kaplan turbina
- Pelton turbina
- Turgo turbina
- Crossflow turbina
- Ostali tipovi



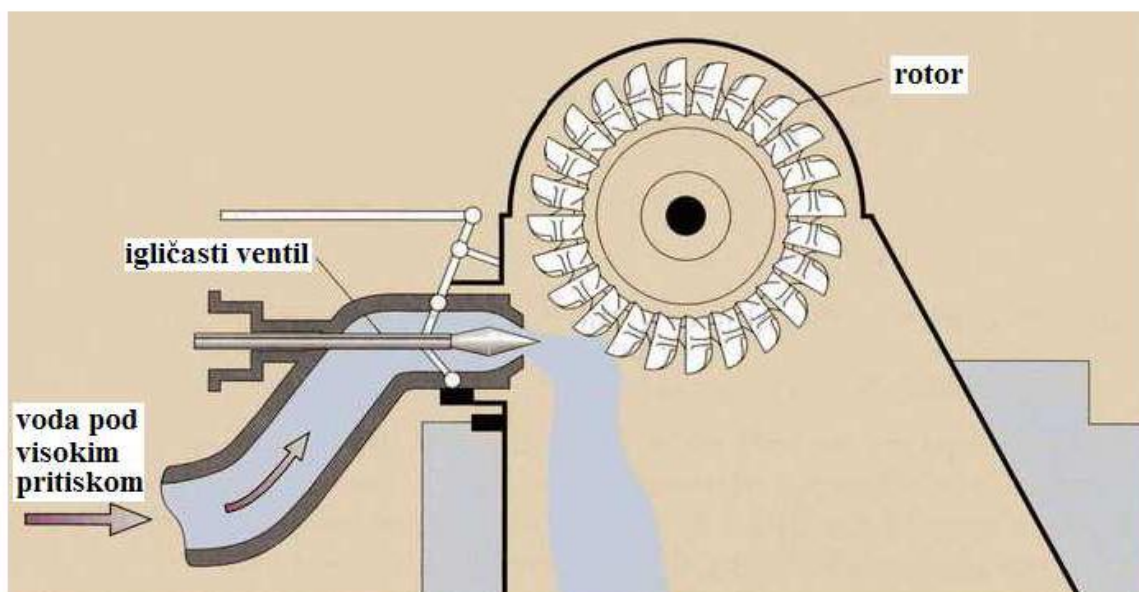
Slika 10. Tipovi turbina



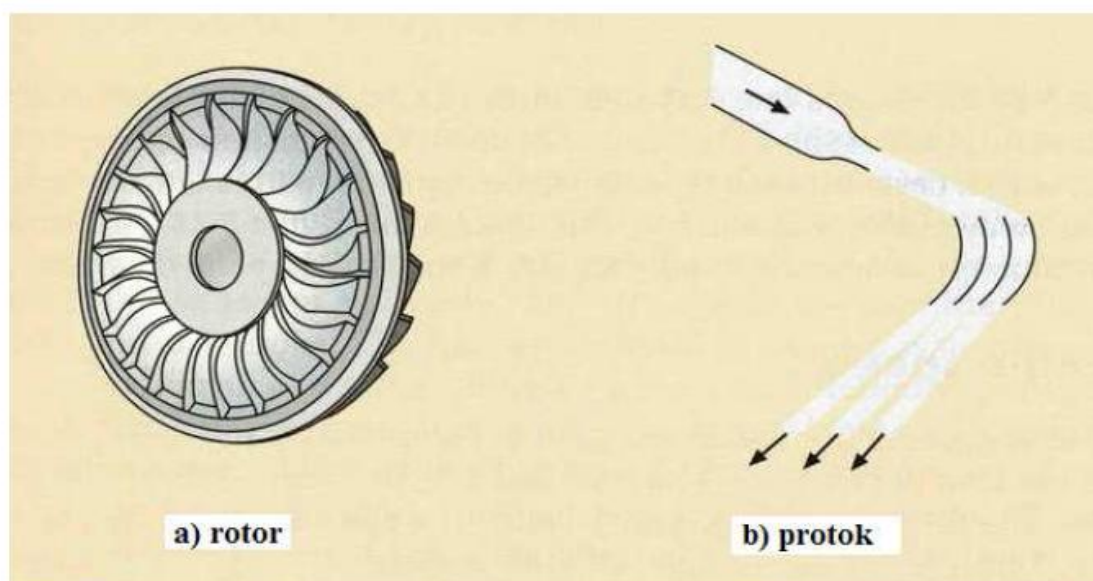
Slika 11. Shema Francis turbine



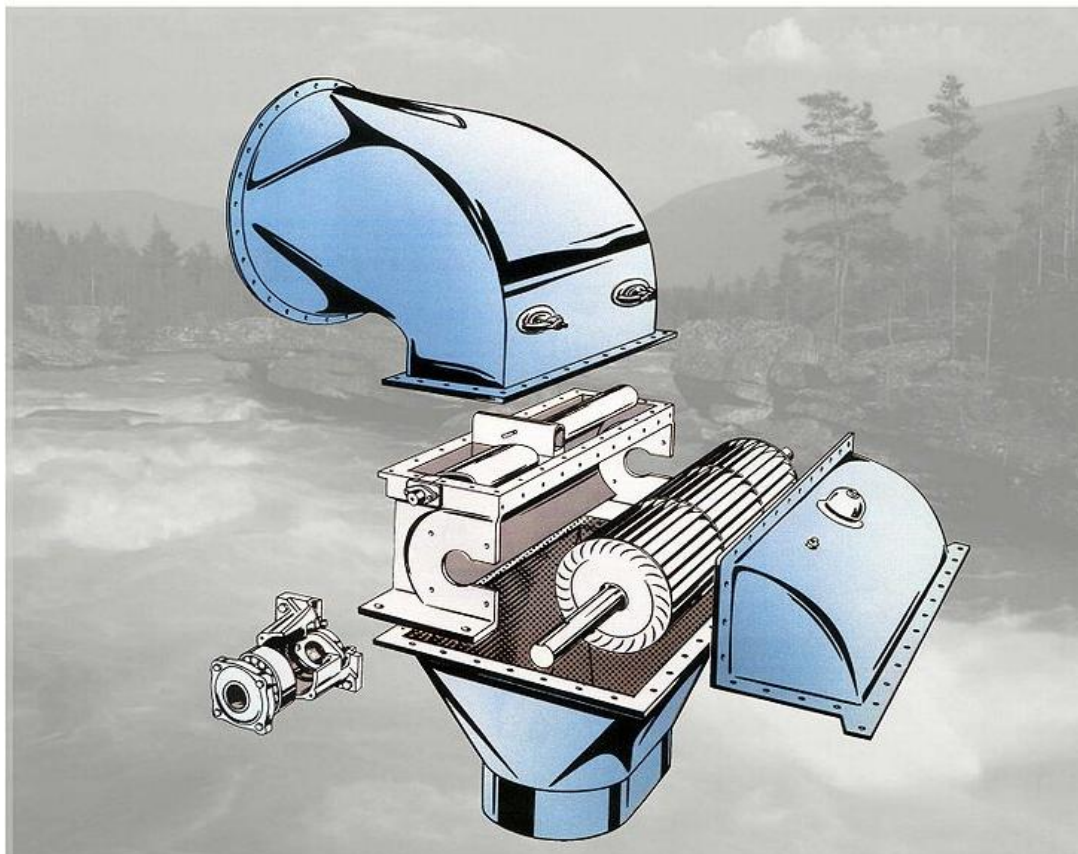
Slika 12. Shema Kaplan turbine



Slika 13. Shema Pelton turbine



Slika 14. Shema Turgo turbine



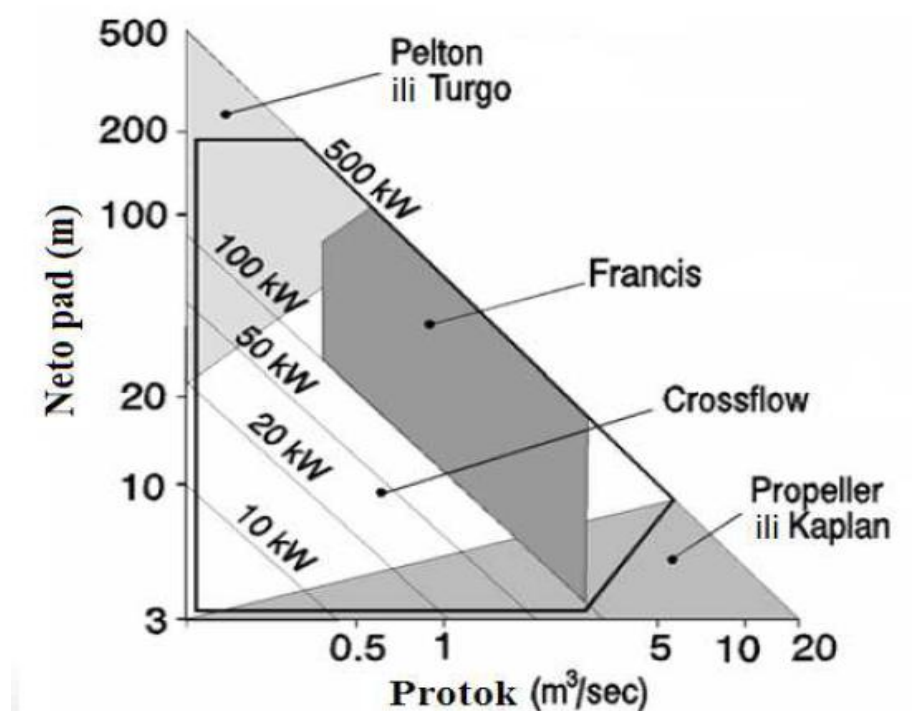
Slika 15. Shema Crossflow turbine

Kod svih tipova turbina za male hidroelektrane traže se dobra regulacijska svojstva, zbog činjenice da iste iskorištavaju hidropotencijal vodotoka vrlo promjenjivih kapaciteta tijekom godine. To znači da ove turbine moraju imati mogućnost promjene protoka [tehnički minimum] u vrlo širokom rasponu, uz zadržavanje dobre iskoristivosti [stupnja djelovanja]. Prosječni se tehnički minimum [omjer minimalnog protoka prema maksimalnom] u postocima za klasične turbine kreće: Pelton 20%, Francis 60%, Kaplan [zakretne predrotorske i rotorske lopatice] 40%, propelerna turbina [zakretne samo predrotorske lopatice] 60%, cijevna „S“ turbina 40%.

Radna područja različitih tipova turbina:

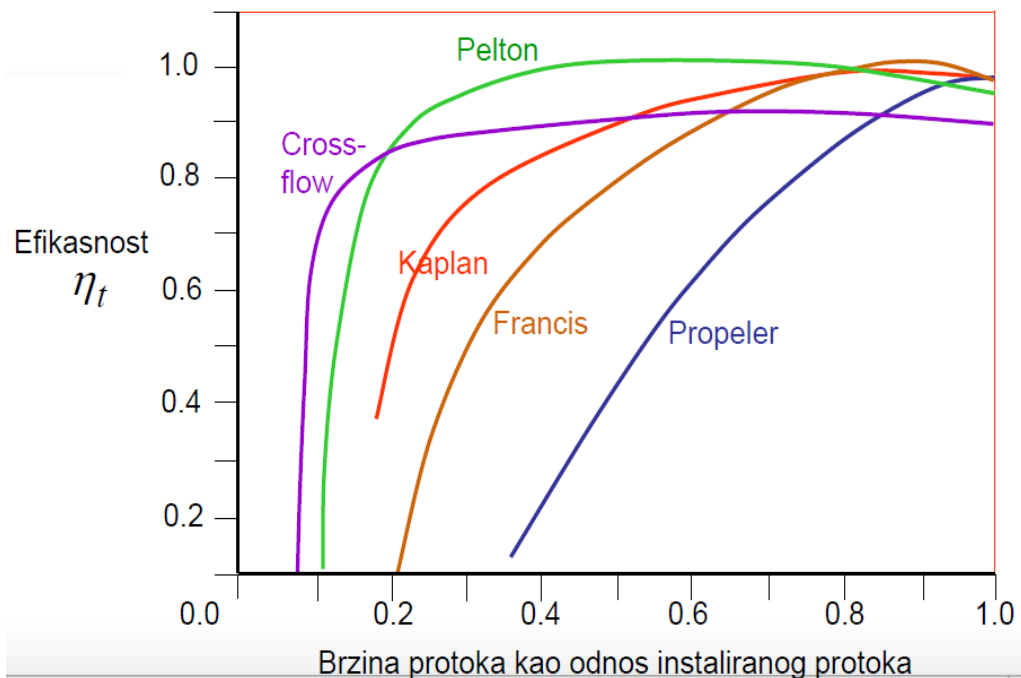
- Kaplan $2 < H < 40$
- Francis $10 < H < 350$
- Turgo $50 < H < 250$ [H= pad u metrima]
- Pelton $50 < H < 1300$

Radna područja različitih turbina prikazana su dijagramom [Slika 16]:



Slika 16. Dijagram područja primjene određenog tipa turbine

- Učinkovitost malih vodnih turbina prikazana je dijagramom[Slika 17]:



Slika 17. Dijagram učinkovitosti vodnih turbina

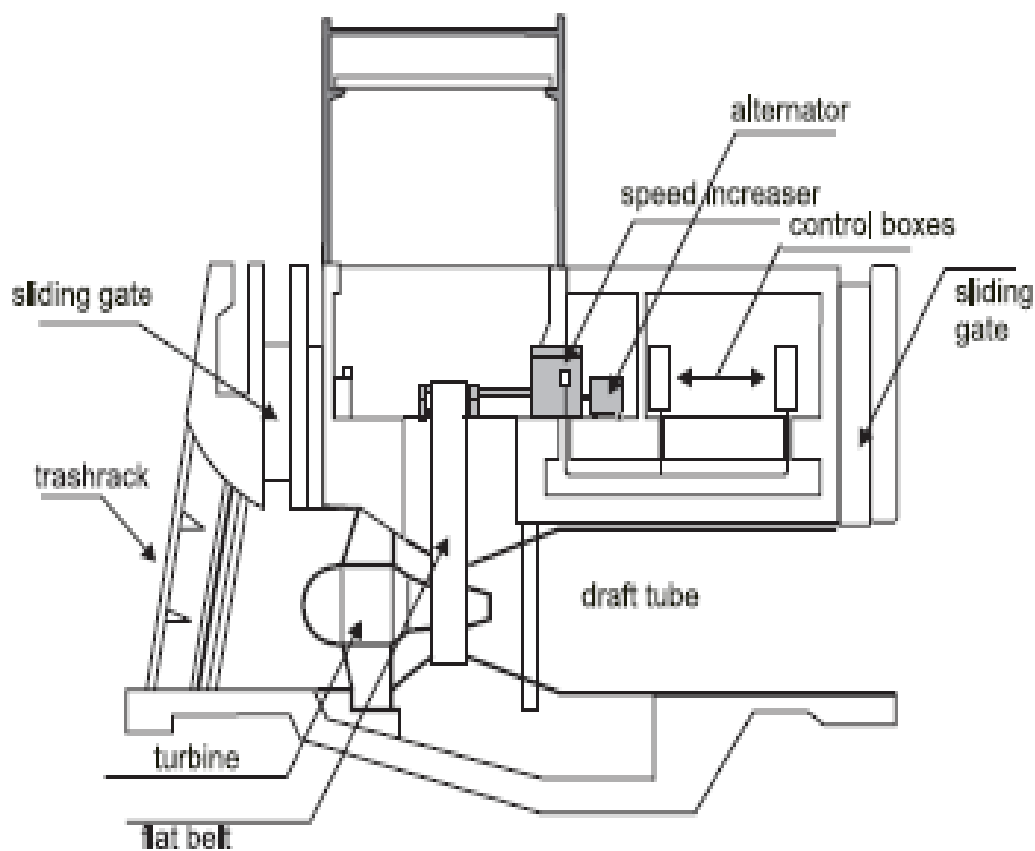
Izbor tipa turbine:

PAD			
	VELIK	SREDNJI	NISKI
AKCIJSKA	PELTON TURGO	CROSSFLOW TURGO PELTON	CROSSFLOW
REAKCIJSKA		FRANCIS	PROPELTERNA KAPLAN

Tablica 1. Tipovi turbina za određeni pad

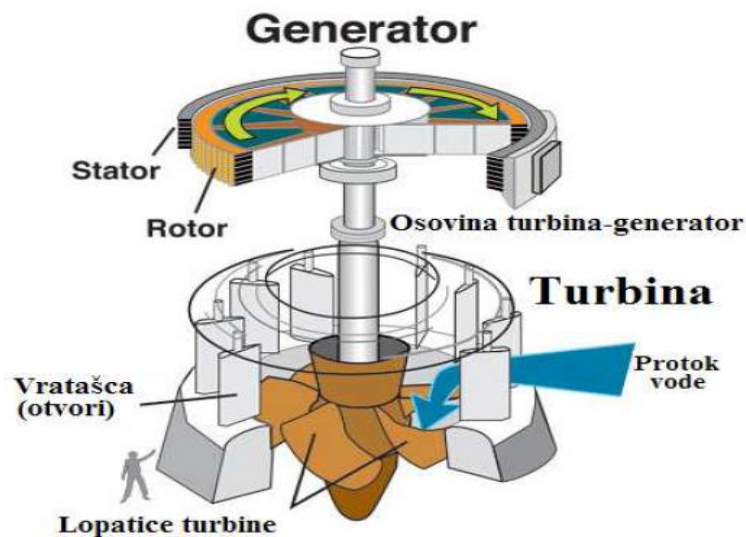
7.1.3.2. Multiplikatori

Kod geodetskih padova manjih od 20 m, broj okretaja turbine u optimalnoj radnoj točki je nizak. Zbog premalog broja polova generatora koji se koriste kod malih hidroelektrana potreban je multiplikator[Slika 18] broja okretaja. Ovaj uređaj povećava broj okretaja turbine na odgovarajući broj okretajarotora generatora. Kod manjih snaga [do oko 500 kW] koristi se multiplikator s plosnatim remenskim prijenosom, a za veće snage koriste se zupčasti multiplikatori s čeonim zupčanicima.



Slika 18. Shema multiplikatora

7.1.3.3. Generatori



Slika 19. Shema generatora sa turbinom

Generatori pretvaraju mehaničku energiju u električnu.

Generatori mogu biti:

- Sinkroni generator, opremljen s vlastitim sustavom uzbude
- Asinkroni, koji uzbudu vuče iz mreže

Sinkroni generator može funkcionirati izolirano [odvojen od elektroenergetske mreže], dok asinkroni generator za normalno funkcioniranje mora biti u vezi sa ostalim generatorima [odnosno priključen na elektroenergetski sustav].

Sinkroni generatori se koriste kao primarni izvori proizvodnje energije u elektroenergetskim sustavima, ali također i u manjim izoliranim mrežama kao i za samostalne primjene malih hidroelektrana.

Asinkroni generator često su najjednostavnije i najjeftinije rješenje za male hidroelektrane koje proizvode električnu energiju za isporuku u postojeću veliku elektroenergetsku mrežu.

7.1.3.4. Transformatori

Transformator kao komponenta male hidroelektrane dolazi u obzir samo kod većih snaga postrojenja [iznad 100 kW] jer se u tim slučajevima predviđa priključak na mrežu višeg napona, pa je transformacija napona neizbježna. Kod manjih snaga priključak postrojenja izvodi se direktno na distribucijsku mrežu nižeg napona i transformator kao takav nije potreban. Također kod novijih tipova turbina za male hidroelektrane se transformator izvodi integriran na turbinu, obložen nepropusnim materijalima te se u tom slučaju u strojarnici koja tada postaje praktički samo upravljačka stanica, dobiva napon za priključak na elektroenergetsku mrežu.

7.1.3.5. Automatsko upravljanje

Male hidroelektrane obično su bez nadzora i upravljane putem automatskog upravljačkog sustava. Budući da nisu sve elektrane jednake, gotovo je nemoguće utvrditi opseg automatizacije koji bi trebao biti uključen u određenom sustavu, ali neki zahtjevi su standardni:

- a) Sva oprema mora biti opremljena sa ručnim upravljanjem i biti potpuno neovisna o programskoj kontroli koja će se koristiti samo za početak rada i postupke održavanja.
- b) Sustav mora sadržavati potrebne uređaje za otkrivanje kvara ozbiljne prirode, a zatim djelovati kako bi jedinice ili cijelo postrojenja bilo osigurano.
- c) relevantni operativni podaci male elektrane trebaju biti prikupljeni i uvijek na raspolaganju za donošenje poslovnih odluka, te pohranjeni u bazu podataka za kasnije.
- d) inteligentni sustav kontrole treba biti uključen kako bi se omogućio rad pogona u okruženju bez nadzora.
- e) Mora biti moguće pristupiti kontroli sustava s udaljenog mjesta te biti u mogućnosti zaobići bilo koju automatsku odluku.
- f) sustav bi trebao biti u mogućnosti komunicirati sa sličnim jedinicama, kako uzvodno tako i nizvodno, ukoliko iste postoje, u svrhu optimizacije operativnih postupaka.
- g) predviđanje kvara predstavlja poboljšanje sustava kontrole. Korištenjem stručnih sustava, u koji se unosi operativne podatke, moguće je predvidjeti kvarove prije nego su nastali i poduzeti korektivne akcije, tako da se kvar ne pojavi.

8. Alati za izradu tehno-ekonomske analize lokacija predviđenih za izgradnju male hidroelektrane

Izrada tehno-ekonomske analize za male hidroelektrane zahtijeva detaljnu analizu makro i mikro lokacije, hidrološka ispitivanja i mjerenja protoka vodotoka. Za početak ispitivanja potrebno je odabrati mikrolokaciju na kojoj će se izvoditi ispitivanja hidropotencijala. Protok vode i geodetski pad na mikrolokaciji su najvažniji parametri po kojima se može predvidjeti iskoristivost hidropotencijala mikrolokacije te se na osnovu tih dvaju parametara temelje početna ispitivanja lokacije. Budući se podaci o protoku moraju uzeti za višegodišnji period u sklopu izrade tehnoekonomske analize koriste se podaci Hrvatskog hidrometeorološkog zavoda koji je jedini mjerodavan u izdavanju podataka o višegodišnjim protocima pojedinih rijeka na kojima imaju svoje mjerne stanice. Nakon prikupljanja podataka o protoku izrađuje se krivulja trajanja protoka na odabranoj mikrolokaciji tako što se uzimaju podaci za period od minimalno 10 godina te izračunavaju srednje vrijednosti godišnjih protoka te se na kraju te srednje vrijednosti koriste za izradu krivulje trajanja protoka. Nakon izrade krivulje trajanja protoka potrebno je izvršiti mjerenja geodetskog pada vodotoka na mikrolokaciji kako se bi se izračunala visinska razlika vodotoka od ulaza u zahvatni kanal budućeg postrojenja do njegovog izlaska iz odvodnog kanala. Naravno, što je veći protok vode kroz turbinu male hidroelektrane i što je veća visinska razlika od ulaza do izlaza, to će biti i veća iskoristivost hidropotencijala mikrolokacije, odnosno veća snaga postrojenja.

Nakon odabira mikrolokacije i izrade krivulje trajanja protoka potrebno je odabrati i vrstu postrojenja zavisno o konfiguraciji mikrolokacije u svrhu maksimalnog iskorištenja hidropotencijala. Nakon toga definiraju se hidromehaničke građevine potrebne za postrojenje, važnije hidromehaničke građevine su: brana [ukoliko ista već ne postoji na mikrolokaciji], gornji vodozahvatni kanal sa zapornicom i grubom rešetkom, strojarnica sa turbinom i generatorom, te donji derivacijski kanal. Zatim se na temelju proračuna o srednjem protoku i geodetskom padu odabire tip turbine za postrojenje. Nakon što smo odabrali tip turbine potrebno je za istu odrediti i tip generatora, te definirati priključak postrojenja na mrežu. Temeljem odabranih parametara i izabranog turbinskog agregata, mogu se na poziciji definirati hidroenergetski parametri na temelju izračuna očekivanih energetske učinaka. Na kraju se izrađuje procjena troškova izgradnje i ocjena isplativosti projekta.

Na temelju rečenog se definiraju osnovni elementi tehno-ekonomske analize, a to su:

- Odabir pozicije za malu hidroelektranu
- Hidroenergetski i prostorni parametri pozicije
- Krivulja trajanja protoka
- Geodetski pad pozicije
- Odabir vrste postrojenja
- Hidromehaničke građevine
- Odabir tipa turbine i generatora te priključka na mrežu
- Izračun očekivanih energetske učinaka
- Procjena troškova izgradnje
- Ocjena isplativosti projekta

U nastavku je prikazan primjer tehno-ekonomske analize za izgradnju postrojenja male hidroelektrane na mikrolokaciji na rijeci Orljavi u Brodsko-posavskoj županiji izrađena na osnovu podataka o srednjem dnevnom protoku rijeke Orljave na mjernoj stanici Pleternica, dobivenih od državnog hidrometeorološkog zavoda, te geodetskim mjerenjima pada vodotoka na mikrolokaciji. Analiza je napravljena u svrhu dobivanja prethodnog energetskeg odobrenja od strane Ministarstva gospodarstva, rada i poduzetništva. Analiza je napravljena na osnovu prikupljenih podataka bez korištenja suvremenih računalnih alata izrađenih u svrhu izrade tehno-ekonomskih analiza za postrojenja malih hidroelektrana.

8.1. Preliminarna analiza izvodljivosti za malu hidroelektranu “Lužani”

Sažetak:

U radu su opisane tehničko-ekonomske karakteristike izgradnje mHE Lužani u brodsko-posavskoj županiji. Iznesen je kratak opis područja te mikrolokacije samoga zahvata, moguće izvedbe postrojenja kao i njihove tehničko-ekonomske karakteristike. Također je izrađen i kratak izračun isplativosti projekta u odnosu na predviđene troškove same izgradnje i nabave opreme. Na kraju je donesen zaključak o realizaciji projekta na temelju izračuna isplativosti.

Analiza je napravljena za podnošenje zahtjeva za dobivanje prethodnog energetskog odobrenja.

Opis rijeke i odabrana pozicija

Orljava je rijeka u Hrvatskoj, lijeva pritoka rijeke Save.

Izvire ispod Psunja na nadmorskoj visini višoj od 800 metara i teče od zapada prema istoku. U nju se ulijevaju sve vode gorskih potoka što okružuju Požešku kotlinu. U Požegi u Orljavu utječe njezin najveći pritok s Papuka – Veličanka i najveći potok s Požeške gore – Vučjak.

Pokraj Pleternice prima pritoku Londžu i mijenja smjer otjecanja prema jugu između Požeške i Dilj gore. Rijeke Orljava i Londža pogodne su za ribolov, a slap na Orljavi kod Pleternice poznato je ribolovno i izletničko mjesto. Također, umjetni slapovi [brana], nalaze se i u selu Lužani, koji će i biti obrađeni u sljedećoj analizi.

Od izvora do utoka duga je 89 kilometara. Orljava je vrlo bogata vodom, naročito u kišovitom periodu godine.

Predmetni dio vodotoka je prikazan na slijedećoj slici [Slika 20]:



Slika 20. Satelitska snimka mikrolokacije

Na odabranom području nalazi se brana, te mlin koji je u privatnom vlasništvu. Upravo zbog postojanja brane ovo je idealna pozicija za izgradnju male hidroelektrane. Brana je dugačka oko 35 m, te se na njoj ostvaruje pad od cca 2.5 m.

Sadašnje stanje brane prikazuje sljedeća slika [Slika 21]:

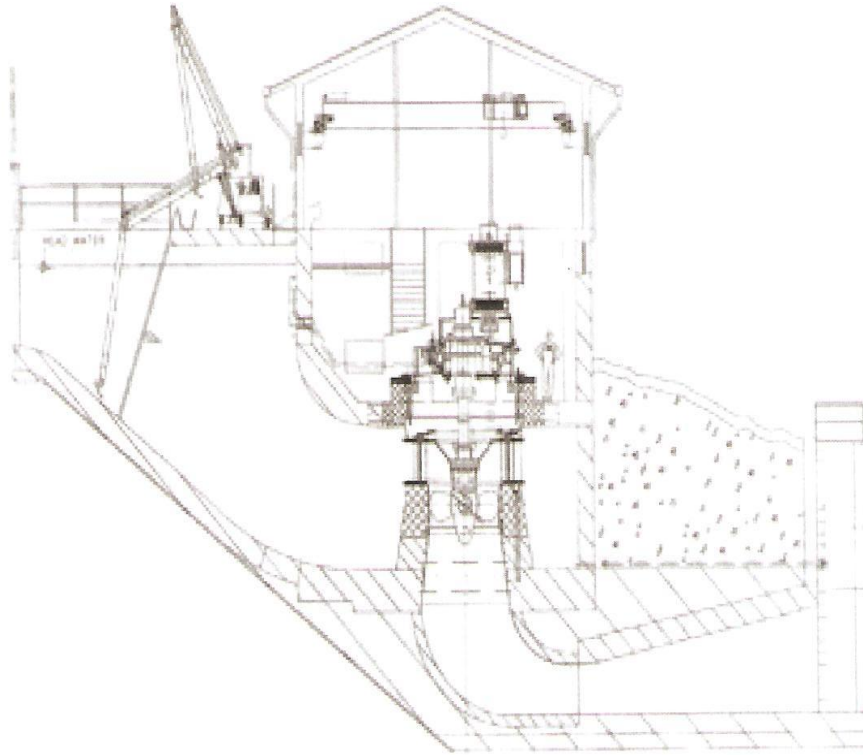


Slika 21. Izgled brane na lokaciji

Odabir pozicije za mHE [opcija 1]

Pozicija je odabrana zbog postojanja same brane koja je u odličnom stanju. Također je zbog obilja vode u Orljavi ovo hidroenergetski vrlo povoljna pozicija. Zbog samog položaja brane te konfiguracije obale i korita rijeke uz samu branu i dalje nizvodno, u koncepciji male hidroelektrane izabran je smještaj iste uz samu branu, odnosno pribranska koncepcija elektrane sa strojarnicom uz branu.

Projekt predviđa ugradnju klasične Kaplanove turbine, što ilustrira sljedeća slika[Slika 22]:



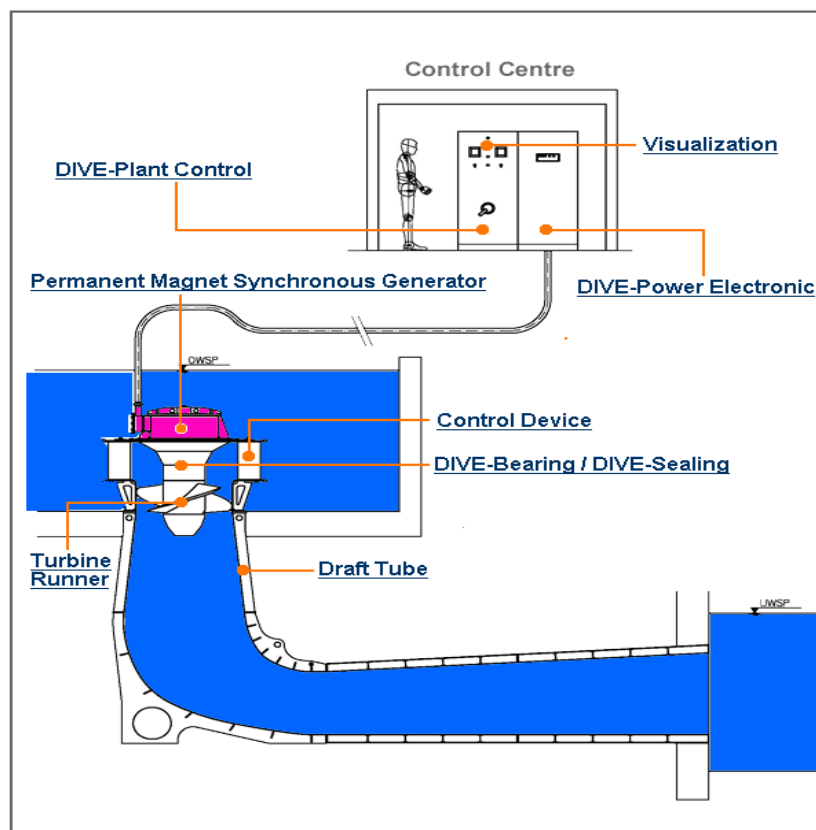
Slika 22. Shema postrojenja sa Kaplan turbinom

Budući da je na odabranoj lokaciji razmjerno malen geodetski pad, preporuča se ugradnja jednog od suvremenih tipova turbina, kao npr. DIVE turbina.[Opcija 2]

Opcija 2:

Kao alternativa razmišlja se o ugradnji DIVE turbine [Slika 23] [nove generacije turbina, vrlo prikladne za ovu lokaciju] s generatorom sa permanentnim magnetom integriranim s turbinom.

Budući postoje i drugi proizvođači turbina prilagođenim za male geodetske padove, vrlo jednostavne konstrukcije i ugradnje, odluka o konačnom tipu turbine donijeti će se pri izradi idejne studije projekta.



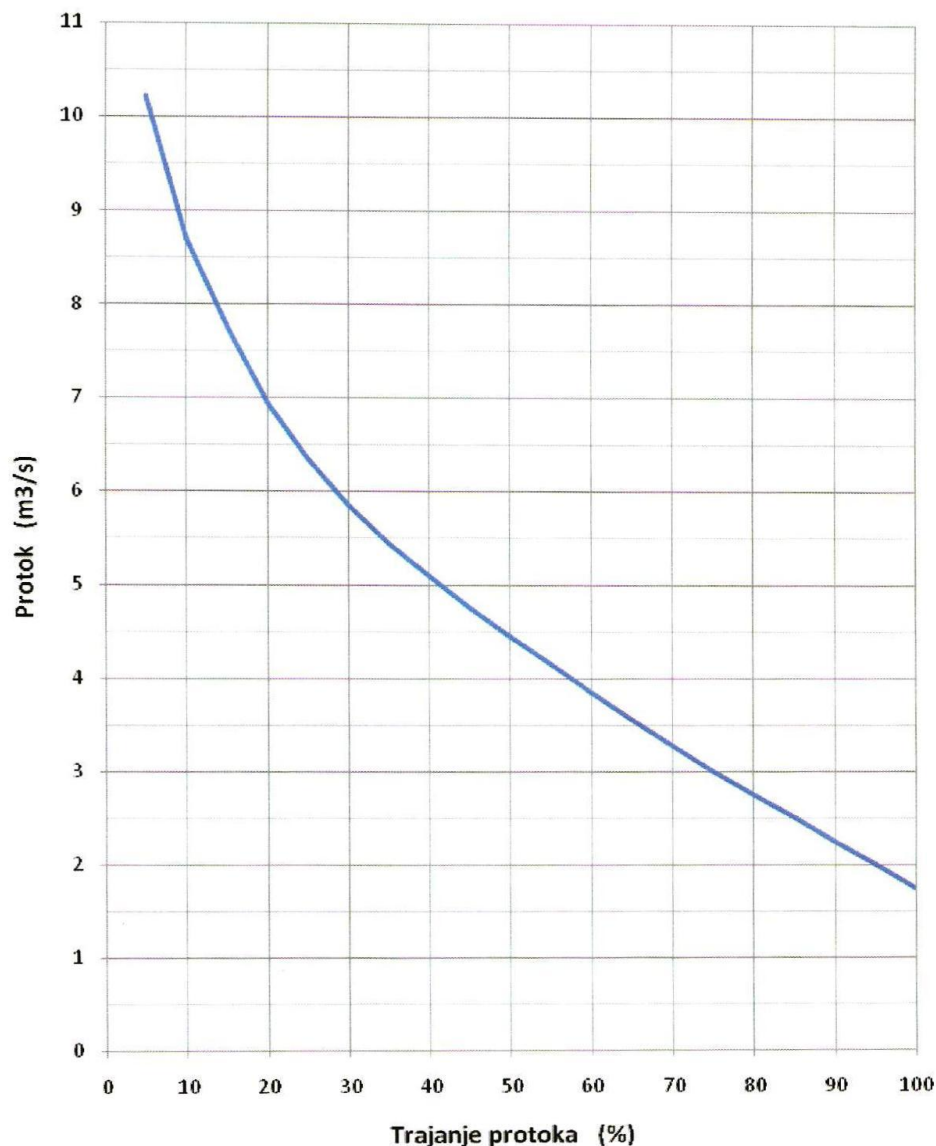
Slika 23. Prikaz postrojenja sa ugrađenom DIVE turbinom

Hydroenergetski i prostorni parametri pozicije

Krivulja trajanja protoka

Za potrebe ove analize se raspolaze s krivuljom trajanja [Slika 24] protoka mjerenoj na mjernoj stanici Pleternica u razdoblju od 1999. do 2007. godine.

Temeljem spomenutih mjerenja u Pleternici izračunata je krivulja trajanja protoka za promatranu poziciju, koja je prikazana na sljedećem dijagramu:



Slika 24. Krivulja trajanja protoka

Zbog činjenice da su podaci dobiveni od Državnog hidrometeorološkog zavoda, jedine institucije u Republici Hrvatskoj koja raspolaže višegodišnjim podacima o protocima hrvatskih rijeka, nije potrebno nikakvo dodatno mjernje potencijala o čemu govori PRAVILNIK O KORIŠTENJU OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE I KOGENERACIJE. Također, obzirom da se odabrana pozicija nalazi oko 25 km nizvodno od mjerne stanice u Pleternici, te da postoji nekoliko kanala pritoka Orpljave na tom području iz slivnog područja okolnih brda odabire se nešto veći protok za odabranu poziciju te on iznosi:

$$Q = 8,2 \text{ m}^3/\text{s}$$

Geodetski pad na odabranoj poziciji određuje se podacima o visini brane i geodetskom padu toka rijeke na toj poziciji te on iznosi:

$$H_{\text{geo}} = 2.5 \text{ m}$$

Prostorne mogućnosti za smještaj elektrane

Za smještaj ovog postrojenja odabrana je pozicija prema konfiguraciji tla uz branu, odnosno pribranska koncepcija elektrane.

Odabir vrste postrojenja

Mala hidroelektrana mHE Lužani je pribransko postrojenje koje koristi prirodni hidropotencijal pozicije uzrokovan postojanjem brane.

Strojarnica je jednostavni prizemni objekt uz branu približnih dimenzija 5.5x5.5 m i u njoj će biti smješten generatorsko-turbinski agregat sa svom pratećom opremom, kao i komandna prostorija. Uz ovo postrojenje biti će potrebno izgraditi rasklopno postrojenje s električnim brojilima, koje će omogućavati priključenje elektrane na obližnji dalekovod ili trafostanicu u selu Lužani.

Ukoliko se bude ugrađivala DIVE turbina ili jedan od novijih koncepata turbina prilagođenih malim geodetskim padovima sve reference postrojenja dobit će se od proizvođača na temelju karakteristika odabrane lokacije što će detaljno biti obrađeno u idejnom projektu.

Hidromehaničke građevine [za opciju 1]

Važnije hidromehaničke građevine su: niska betonska brana s prelazom na vrećastu branu, vodozahvatna građevina s grubom rešetkom i segmentnom zapornicom koja treba omogućiti dovod vode kad je gornji derivacijski kanal u remontu. Do strojarnice vodi gornji derivacijski kanal trapeznog presjeka, kako je to već prije navedeno.

Prije ulaska u strojarnicu nalazi se fina rešetka a iza nje segmentni zatvarač kojim se može zatvoriti ulaz u turbinsku komoru za vrijeme remonta turbine. Po izlasku iz difuzora turbine, nalazi se također segmentna zapornica pomoću koje se spriječava dolazak vode u turbine iz

donjeg derivacijskog kanala za vrijeme remonta turbine. Donji derivacijski kanal je istog presjeka kao i gornji. Ostali detalji hidromehaničkih građevina će biti definirani u idejnom projektu ovog postrojenja.

Ukoliko se odluči za opciju 2, svi podaci o hidromehaničkim radovima biti će dobiveni od proizvođača u odnosu na snagu elektrane. Budući se radi o suvremenijem pristupu projektiranja i potrebni hidromehanički zahtjevi biti će manji. Također sve reference izgradnje biti će detaljno opisane u idejnom projektu.

Odabir tipa turbine

Temeljem odabranog instaliranog protoka i geodetskog pada izabire se odgovarajuća Kaplanova turbina. Iz kineske ponude vodnih turbina za navedene uvjete odgovara turbina:

ZD 500-LH-180, sa slijedećim nominalnim parametrima:

neto pad 3,9 m

protok 8,55 m³/s

broj okretaja 250 min⁻¹

snaga 278 kW

efikasnost 85 %

koja je nešto većih dimenzija, što znači da će moći raditi i pri nešto većim protocima od odabranog instaliranog protoka.

Za opciju 2, tip turbine odredit će proizvođač na osnovu dobivenih referenci te će isti biti detaljno opisan u idejnom projektu.

Odabir tipa generatora i priključak postrojenja na mrežu

Prednost kineske proizvodnje turbinskih agregata je u tome što ista obuhvaća izgradnju višepolnih generatora i manjih snaga nego je to na zapadu uobičajeno. Time se kod manjih jedinica izbjegava primjena multiplikatora, što bitno smanjuje cijenu ovakvih agregata.

Polazeći od ovoga, iz kineskog proizvodnog programa odabire se generator:

SF 250-24 sa dvadesetčetiri para polova

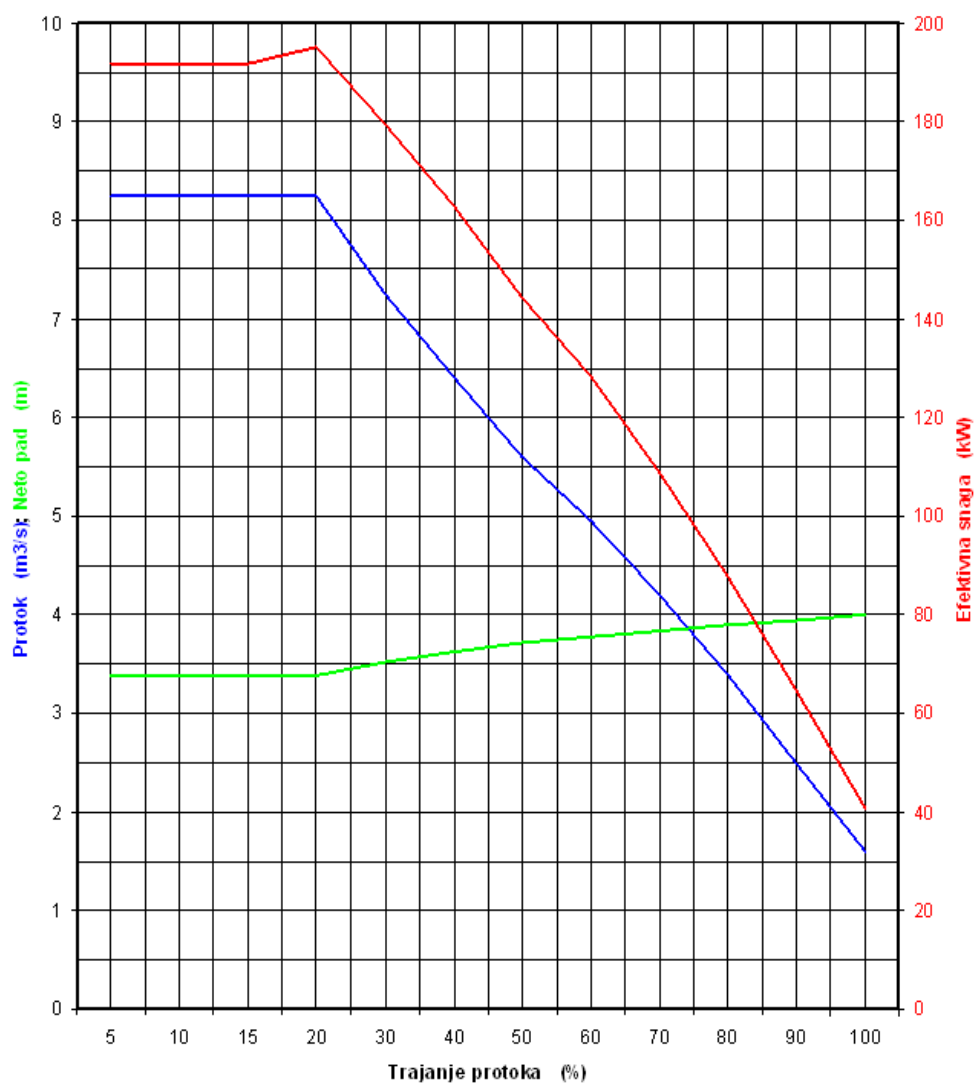
U slučaju ugradnje DIVE turbne generator je jednoznačno definiran odabirom turbine budući je isti integriran sa turbinom.

Proizvedena energija [osim one za lokalne potrebe] u mHE Lužani predat će se u lokalnu srednjenaponsku mrežu t. J. U obližnji srednjenaponski dalekovod 10 kV [naselje Lužani] ili odgovarajuću trafostanicu.

Izračun očekivanih energetske učinaka

Temeljem odabranih parametara i izabranog turbinskog agregata, mogu se na ovoj poziciji postići hidroenergetski parametri prikazani na slijedećem dijagramu [Slika 25]:

Energetske karakteristike mHE Lužani



Slika 25. Energetske karakteristike postrojenja

to jest u maksimalnoj radnoj točki se ostvaruju slijedeći parametri:

- instalirani protok Q_i : $8,2\text{m}^3/\text{s}$
- neto pad H_n pri Q_i : 2,5 m
- maksimalna snaga P_{\max} : 201 kW

Na temelju rečenog može se procijeniti godišnja proizvodnja električne energije u ovoj hidroelektrani na:

1,18 GWh

Procjena troškova izgradnje

Na ulazu u gornji derivacijski kanal postaviti će se gruba rešetka i tablasti zatvarač pomoću kojeg će biti moguće zatvoriti dotok vode u kanal, što je potrebno u slučajevima sanacijskih radova na njemu ili strojarnici.

Strojarnica je smještena oko 70m od zahvata na Orljavi na gornjem derivacijskom kanalu. To je prizemna zgrada kojoj su temelji turbinska komora odnosno difuzor ispod nje. Dimenzija je 6X4 m. Ispred strojarnice se planira postavljanje segmentnog zatvarača i fine rešetke.

Donji derivacijski kanal, istih dimenzija kao i gornji, imat će na svom početku, a na izlazu iz difuzora, segmentni zatvarač pomoću kojeg će se spriječiti ulazak donje vode u difuzor i turbinu, što je potrebno dok traju remontni radovi na agregatu.

Trafostanica i rasklopno postrojenje [RP] predviđa se izvesti dijelom na vanjskom prostoru a manjim dijelom u zgradi strojarnice. Na vanjskom prostoru je mrežni transformator 10,5/35 kV [ili drugo, ovisno o energetskej suglasnosti] 3,2 MVA s pripadajućom opremom. Da ne bi došlo do zagađivanja rijeke i okoline razlivenim uljem, predviđena je izgradnja uljne jame.

Sanirat će se postojeća macadam cesta u dužini oko 500 m.

Grubom procjenom glavnih građevinskih radova, koji su:

Iskop zemlje 7.000 m³

Čišćenje terena 4.000 m³

Beton 280 m³
Betonski čelik 1.000 kg
Čelik 17.500 kg
Izrada ceste 0,5 km

te glavne opreme:

Hidromehanička i elektrostrojarska oprema 50 t može se procijeniti okvirna cijena koštanja ove varijante na oko

380.000 €

odnosno oko:

2,720.000 HRK

Odnosno ukoliko se odabere ugradnja DIVE turbine tada će cijena biti nešto viša ali ne u toj mjeri da utječe na isplativost projekta, budući se ugradnjom DIVE turbine postiže veće iskorištenje potencijala od 95-98% te su manji mehaničko-građevinski radovi budući da za Dive turbine nije potrebna izgradnja klasične strojarnice već samo upravljačka stanica vrlo malih dimenzija.

Ocjena isplativosti

Temeljem prethodnih podataka mogu se izračunati osnovni pokazatelji isplativosti pojedine investicije, a to su koeficijent snage i koeficijent energije. Za pojedine varijante navedene u ovom materijalu ti koeficijenti iznose:

Koeficijent snage je omjer cijene postrojenja i maksimalne efektivne snage postrojenja, i on za ovu varijantu iznosi:

$$c_p = \frac{380.000}{201} = 1890.54 \text{ € / kW} = 13517.41 \text{ HRK / kW}$$

Koeficijent energije je omjer cijene postrojenja i godišnje energetske proizvodnje postrojenja i on za ovu varijantu iznosi:

$$c_E = \frac{380.000}{1.180.000} = 0,322 \text{ €} / kWh = 2,30 \text{ HRK} / kWh, \text{ god}$$

Kao dodatni koeficijent za ocjenu isplativosti elektrane pojavljuje se t.zv. „vrijeme korištenja instalirane snage“, to jest omjer godišnje proizvedene energije i nominalne snage postrojenja, pa tako ovaj koeficijent iznosi za:

$$c_h = \frac{1.180.000}{201} = 5870 \text{ sati}$$

Ako se za ocjenu isplativosti ovog postrojenja primjeni članak 4 Tarifnog sustava za proizvodnju električne energije iz OIEIK [uz pretpostavku da je udio domaćeg gospodarstva u cijeni elektrane veći od 70%], onda je cijena energije za obje razmatrane varijante:

0,69 HRK/kWh

što onda nadalje znači da je teoretsko vrijeme povrata kapitala za:

$$\tau = \frac{c_E}{0,69} = \frac{2,30}{0,69} = 3,33 \text{ god}$$

Zaključak

Prethodni parametri pokazuju da je ova pozicija vrlo dobre ekonomske isplativosti. Dugo vrijeme korištenja instalirane snage pokazuje izdašnost vode u rijeci Orljavi, što je posebna kvaliteta ove pozicije. Kratko vrijeme povrata kapitala dodatna je kvaliteta ove pozicije. Zbog rečenog, investitoru se preporuča realizacija ovog postrojenja.

8.2. Računalni alati za izradu tehno-ekonomske analize

Danas se u svrhu izrade tehno-ekonomskih analiza sve više upotrebljavaju računalni alati razvijeni kako bi inženjerima olakšali posao. Ti alati se oslanjaju na bazu podataka koja se formira prema glavnim varijablama potrebnim za izračunavanje osnovnih parametara za dimenzioniranje male hidroelektrane kao što su protok i geodetski pad.

Na tržištu postoji više programskih alata koji su razvijeni kako bi se što točnije i brže radile preliminarne analize projekata izgradnje male hidroelektrane. To je naročito važno zbog velikog broja potencijalnih lokacija pogodnih za izgradnju postrojenja, jer se na taj način brže i točnije eliminiraju neisplative lokacije a lakše i brže se izrađuje projektna dokumentacija potrebna za izgradnju male hidroelektrane.

Neki od softwera za izradu tehno-ekonomske analize su : VAPIDRO-ASTE i SMART MINI-IDRO. Oba programa su predstavljena u sklopu projekta S.M.A.R.T, "*Strategies to promote small scale hydro electricity production in Europe*" Strategije za poticanje proizvodnje električne energije u malim hidro postrojenjima u Europi čiji partner je i Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. SMART projekt [Strategije za poticanje proizvodnje električne energije u malim hidro postrojenjima u Europi] je financiran u sklopu programa Inteligentna energija za Europu [Ugovor broj: EIE-07-064]. Koordinator projekta je Provincija Cremona iz Italije, a ostali partneri su: CESI RICERCA SPA [sada ERSE] iz Italije, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu i Karlovačka županija iz Hrvatske, Norveški fakultet znanosti i tehnologije iz Trondheima, Regionalni sekretariat Attice iz Grčke i Energetska agencija Waldviertel iz Austrije. Trajanje projekta je 36 mjeseci.

SMART projekt identificira najvažnije barijere većoj izgradnji malih hidroelektrana [mHE] u Europi: -nedostatak razvijenih metodologija i alata za određivanje hidropotencijala nekog područja

-složenost pravno-administrativnih procesa i postupaka za dobivanje potrebnih koncesija

-ekonomsko-financijska neatraktivnost za privatne investitore

Glavni cilj projekta je dati jasan doprinos u otklanjanju tih netehničkih prepreka koje se javljaju pri izgradnji mHE, kao koristan alat za lokalne, regionalne, nacionalne i europske donositelje odluka, sve u cilju ekspanzije primjene mHE u Europi. U sklopu projekta su definirane metodologije, alati i dane preporuke za unapređenje upravljanja vodnim resursima, za bolju komunikaciju između svih zainteresiranih strana, te povećanje interesa potencijalnih investitora za investiranje u izgradnju mHE. Nadalje, u zemljama partnerima je odabrano pet reprezentativnih područja kao demonstracijskih za određivanje strateških aktivnosti i prijenos

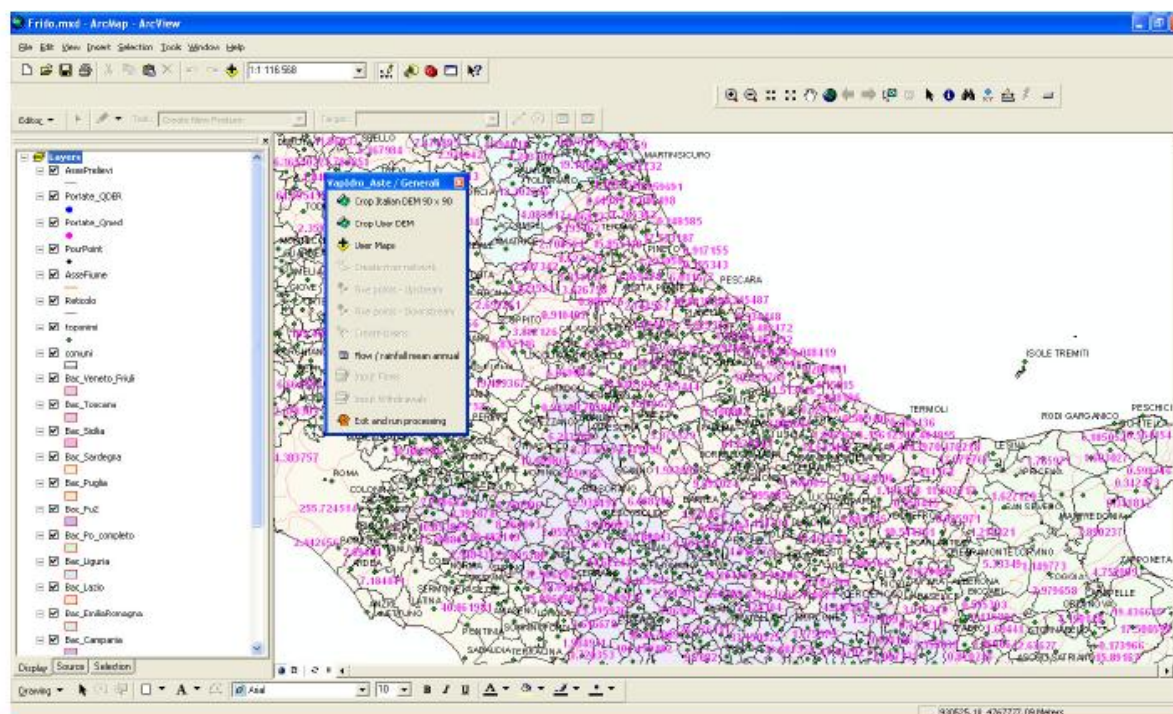
znanja. Daljnje aktivnosti projekta obuhvaćaju izradu alata, internetskih stranica, brošura i publikacija, te organizaciju sastanaka i radionica. Ciljne grupe su predstavnici lokalnih, regionalnih i državnih vlasti koji donose odluke.

Računalni alat VAPIDRO-ASTE:

Vapidro-aste je GIS alat za procjenu hidroenergetskog potencijala vodotoka. U mogućnosti je izračunati područja riječnog sliva koja su zanimljiva za proučavanje hidropotencijala koristeći GIS karte iz vlastite baze podataka. GIS karte predstavljaju suvremeni pristup u određivanju hidropotencijala jer koriste topografiju satelitskih snimki područja. U bazi podataka programa su trodimenzionalne satelitske karte područja tako da je za određenu mikrolokaciju moguće odrediti točan geodetski pad na mikrolokaciji. Program također koristi i bazu podataka o srednjim dnevnim protocima vodotoka tako da je korištenjem ovog alata moguće na vrlo jednostavan način dobiti podatke o krivulji trajanja protoka i geodetskom padu a zatim program vrlo jednostavno i brzo generira podatke i određuje hidropotencijal na odabranoj mikrolokaciji, proračunava instaliranu snagu turbine te godišnju proizvodnju električne energije. Alat vodi korisnika kroz program kako bi izradio najbolju moguću hidroenergetsku konfiguraciju. Dovoljno je da korisnik odabere gornju i donju točku na karti i program će za zadane točke odrediti geodetski pad između točaka. Rezultate je moguće prikazati u microsoft excelu. Program također ima mogućnost optimizacije rješenja. Na osnovu baze podataka programa, od nekoliko potencijalnih lokacija program odabire najbolju.



Slika 26. Izgled programa Vapidro-Aste



Slika 27. Prikaz GIS karte za područje Italije

Pomoću GIS karte vrlo se lako definira područje zanimljivo za ispitivanje hidropotencijala. Odnosno korištenjem GIS karata se uveliko smanjilo vrijeme ispitivanja hidropotencijala, naročito za teško dostupna područja.

SMART MINI-IDRO-alat za izradu tehno-ekonomske analize.

Smart mini-idro je alat koji koristi platformu microsoft EXCEL programa za generiranje podataka. Program obrađuje glavne hidroenergetske parametre koji se koriste za izradu projektne dokumentacije. Glavni parametri koji se koriste pri unosu podataka u program su krivulja protoka vodotoka, izmjerene geodetske visine gornjeg i donjeg vodotoka, tipovi turbina koji se koriste u postrojenjima malih hidroelektrana te raspon snage koja se planira ostvariti na zahvatu.

Softver se sastoji o sljedećih 5 modula:

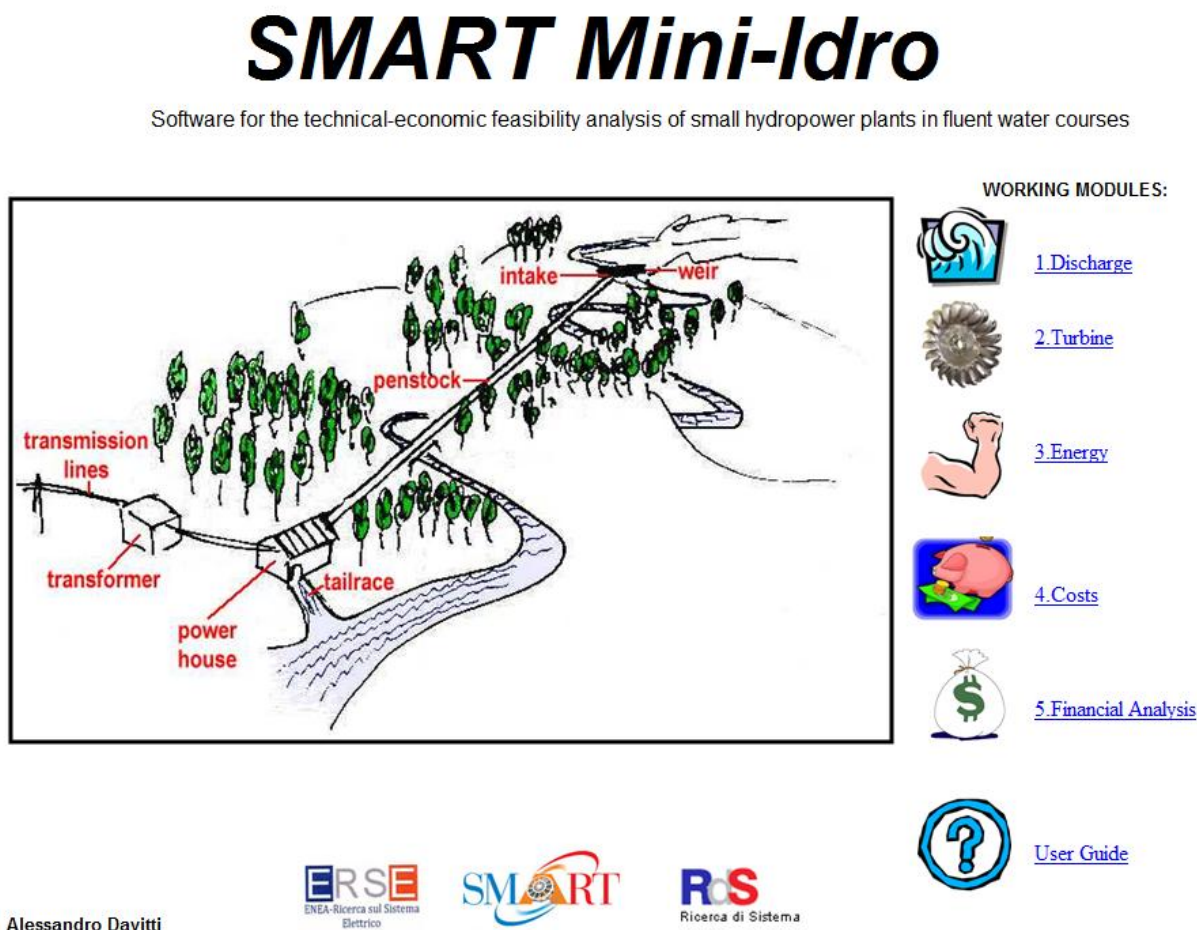
- Modul snage protoka sa proračunom minimalnog protoka i protoka kroz turbinu.
- Modul turbine koji na temelju proračuna protoka i geodetskog pada odabire odgovorajući tip turbine iz baze podataka.
- Modul energije sa proračunom proizvodnje energije.
- Modul troškova koji izračunava konstrukcijske troškove i troškove održavanja.
- Modul financijske analize sa prikazom tijeka novca.

Modul snage protoka definira krivulju trajanja protoka koja će se koristiti u projektu, minimalni protok okoliša i hidroenergetsko pražnjenje koje će se dovesti turbini.

U daljnjem radu je uz pomoć programa Smart Mini-Idro izrađena tehno-ekonomska analiza za lokaciju u Brodsko-posavskoj županiji za izgradnju male hidroelektrane „Lužani“. Korišteni su isti podaci o protoku i geodetskim visinama kao i u tehno-ekonomskoj analizi izrađenoj bez korištenja računalnih alata.

8.2.1. Izrada tehno-ekonomske analize pomoću programa Smart Mini-Idro

Na donjoj slici [Slika 28] je prikazan izgled glavnog izbornika programa.



Slika 28. Izgled glavnog izbornika programa Smart Mini-Idro

Prvi korak pri izradi tehno-ekonomske analize korištenjem programa Smart Mini-Idro je definirati krivulju trajanja protoka na odabranoj lokaciji [Slika 29] unošenjem vrijednosti protoka u zavisnosti o trajanju istog.



1. Discharge



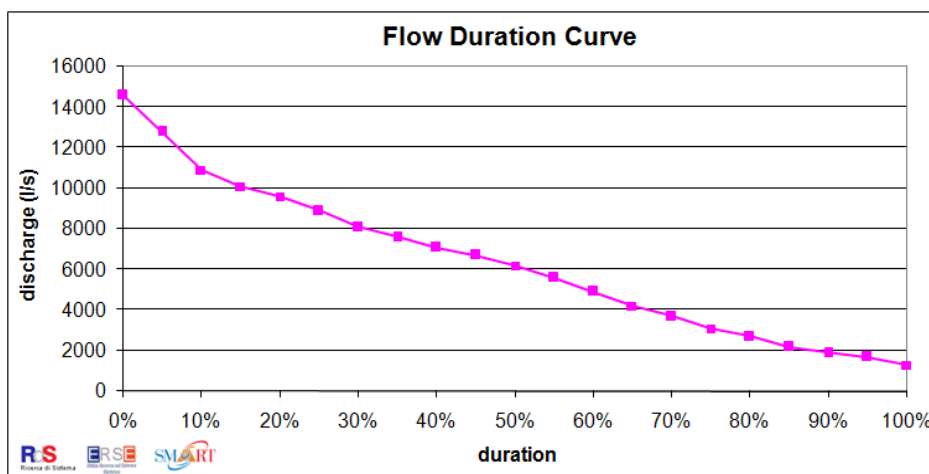
1.1 Flow Duration Curve calculation

Flow Duration Curve input:

☐ Lombardia Regional curve (Italy)
 ☒ Direct input

duration (%)	discharge (l/s)
0%	14600,0
5%	12800,0
10%	10900,0
15%	10100,0
20%	9600,0
25%	8900,0
30%	8100,0
35%	7600,0
40%	7100,0
45%	6700,0
50%	6200,0
55%	5600,0
60%	4900,0
65%	4200,0
70%	3700,0
75%	3100,0
80%	2700,0
85%	2200,0
90%	1900,0
95%	1700,0
100%	1300,0

Qmean (l/s) 6376,2



Slika 29. Proračun krivulje trajanja protoka

Nakon definiranja krivulje trajanja protoka potrebno je odrediti minimalni protok okoliša [Slika 30], koji je definiran zakonom o zaštiti okoliša, minimalni protok okoliša je definiran kao minimalni protok koji se mora osigurati kako se ne bi narušila prirodna ravnoteža na lokaciji, a još se naziva i biološki minimum. Minimalni protok okoliša se unosi izravno ukoliko je poznata vrijednost na danoj lokaciji koja je definirana zakonom ili se uzima postotak srednjeg protoka vodotoka.

1.2 Minimum Environmental Flow calculation (MIF)

MIF input:

☒ italian low n. 7/02

☐ Direct Input

☐ percentage of Qmean

k (percentage of Qmean)	[%]	10%
M (Morphologic parameter)	[-]	1
Z (environmental parameter)	[-]	1
A (groundwater parameter)	[-]	1
T (modulation parameter)	[-]	1

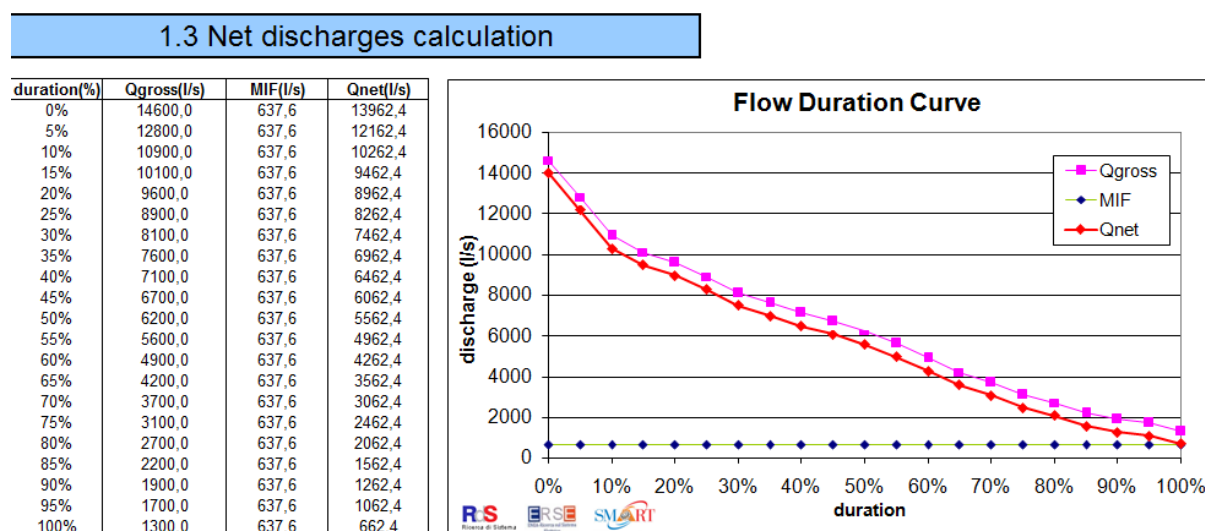
MIF

[l/s]

637,6

Slika 30. Proračun biološkog minimuma vode

Poslije definiranja potrebnog biološkog minimuma protoka, određuje se raspoloživi protok vodotoka Q_{net} , prikazano na [Slika 31]. Potrebno je unijeti u program vrijednosti ukupno raspoloživog protoka i minimalnog biološkog protoka za vrijednosti trajanja protoka od 0%-100%. Vrijednost raspoloživog protoka Q_{net} je razlika ukupnog protoka Q_{gross} i minimalnog biološkog protoka Q_{mif} .

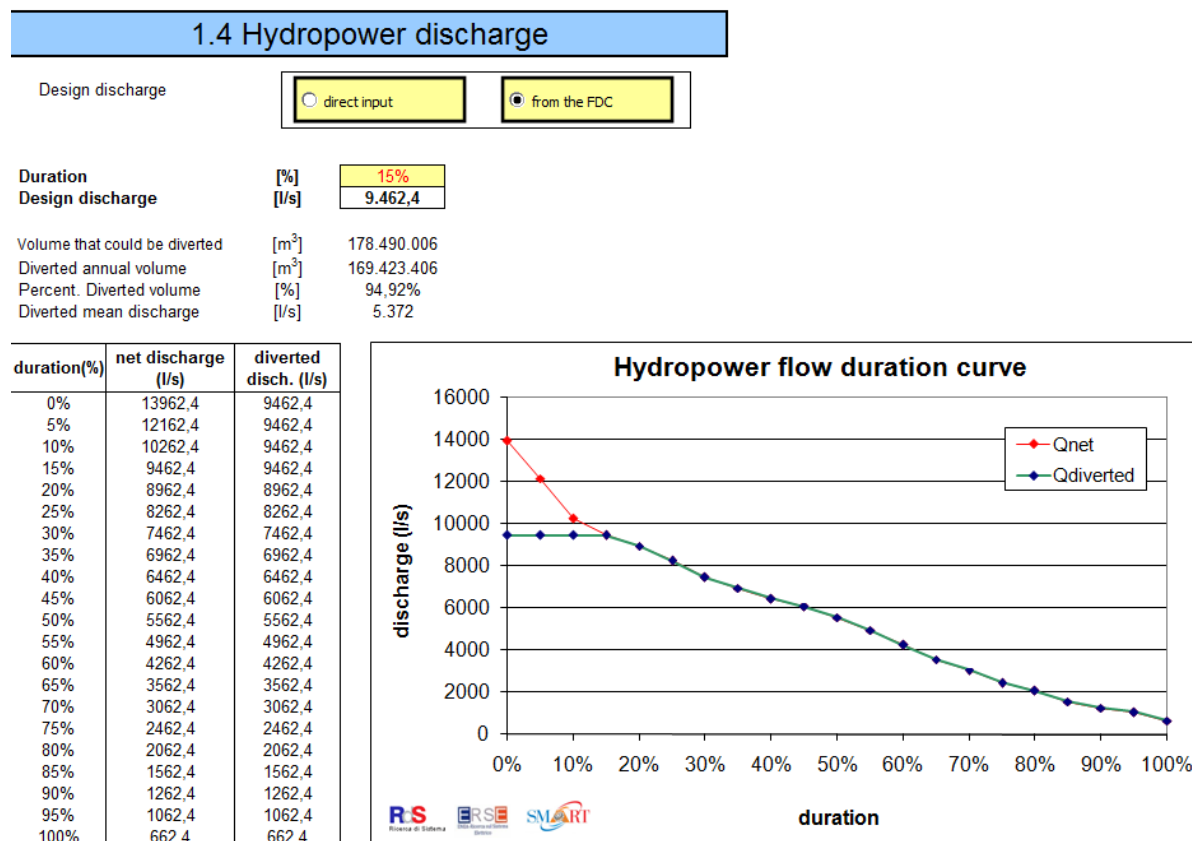


Slika 31. Proračun iskoristivog protoka

Sljedeći korak je je proračun hidroenergetskog protoka, odnosno protoka koji će se dovesti turbini[Slika 32]. Postoje 2 načina za definiranje i unos protoka turbine:

- Unos vrijednosti iz krivulje trajanja protoka
- Direktan unos vrijednosti

Najučinkovitiji način definiranja protoka koji će biti na raspolaganju za prolaz kroz turbinu je taj da se za instalirani protok kroz turbinu uzme 15% vrijednosti ukupnog protoka prikazanog u dijagramu krivulje trajanja protoka.

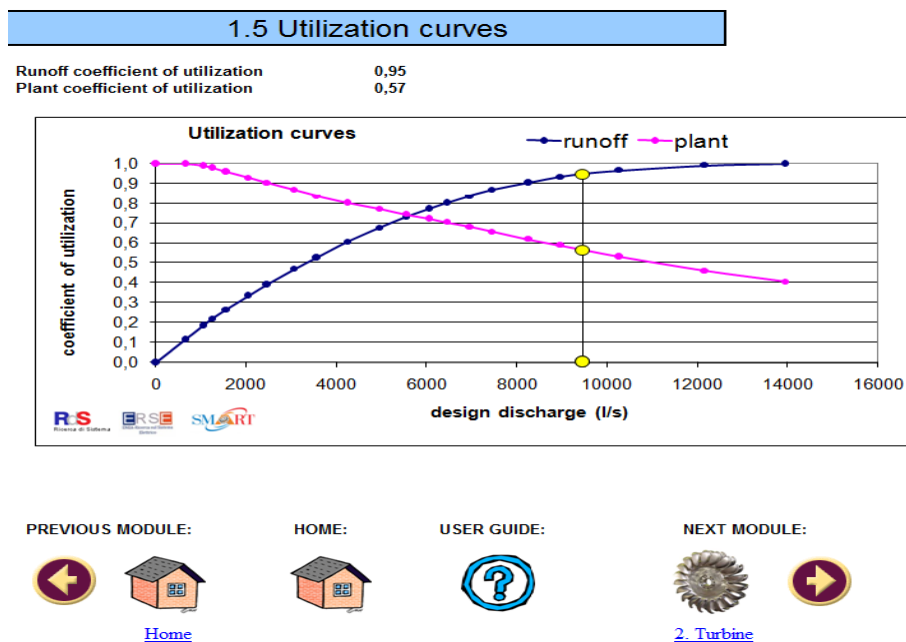


Slika 32. Proračun protoka kroz turbinu

Program Smart mini-idro također prikazuje i 2 krivulje iskoristivosti generirajući podatke.

[Slika 33] prikazuje krivulje iskoristivosti, i to:

- Krivulju iskoristivosti protjecanja
- Krivulju iskoristivosti postrojenja



Slika 33. Krivulje iskoristivosti


Nakon definiranja krivulje trajanja protoka, minimalnog biološkog protoka, protoka kroz turbinu i krivulja iskoristivosti sada program definira izbor tipa turbine. Program pokreće modul izbora turbine koji karakteriziraju 2 koraka:

- Definiranje geodetske visine, duljine tlačnog cjevovoda i hidrauličkih gubitaka
- Izbor tipa turbine


Neto pad se uzima od gornje geodetske visine do izlaznog cjevovoda uključujući sve linijske i lokalne gubitke.




- Linijski gubici se odnose na gubitak uslijed trenja u cijevi zavisno od karakteristike cjevovoda i brzine u cijevi.
- Lokalni gubici su definirani kao gubici kinetičke energije protoka

Na sljedećoj slici [Slika 34] je prikazan prozor za unos podataka pri proračunu geodetskog pada.



2. Turbine



2.1 Net head calculation

Design discharge [l/s] 9462,4

Gross head [m] 3,50

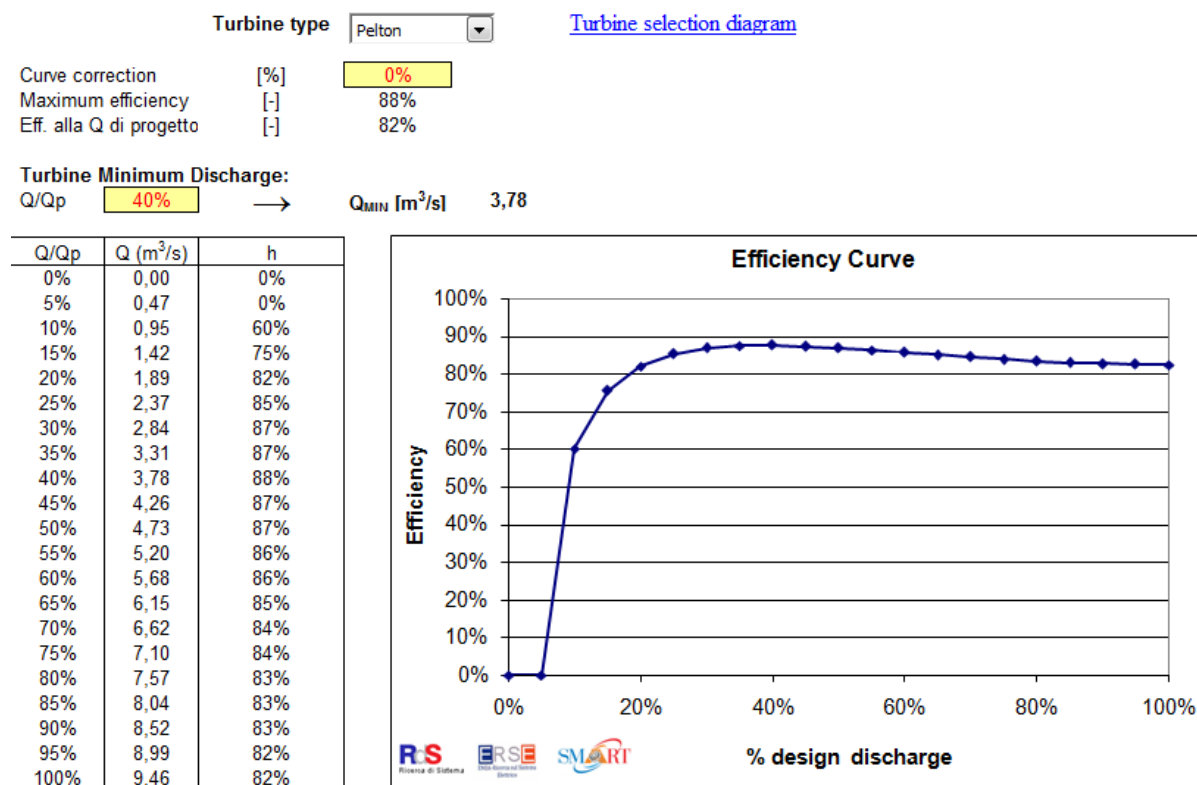
Penstock features:			
Penstock lenght	[m]	15,00	
Design speed in the penstock	[m/s]	5,00	
Strickler roughness	[m ^{1/3} /s]	80	
Penstock diameter	[m]	1,553	→ D_{COMM} [m] 1,600
energy loss (adim)	[-]	0,012	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>maximum distributed loss [m] 0,18</p> <p>maximum percentage loss [%] 5,04%</p> </div> <div> <p>concentrated loss (= $a \cdot V^2/2g$) [m] 0,57 $a =$ 0,5</p> </div> </div>			
net head with design discharge		[m]	2,76

Slika 34. Proračun neto pada u zavisnosti o instaliranom protoku kroz turbinu

Podaci potrebni za proračun su ukupni geodetski pad, duljina tlačnog cjevovoda, instalirana brzina u cjevovodu, visina hrapavosti stijenke cjevovoda i koeficijent brzine α . Kao rezultata dobije se geodetska visina, neto pad za instalirani protok kroz cjevovod.

U idućem koraku [Slika 35] program definira tip turbine koji će se koristiti u radu male hidroelektrane. Za svaki tip turbine program izrađuje krivulju učinkovitosti. Program dopušta korisniku da odabere izravno tip turbine za koju će tada program generirati krivulju učinkovitosti, ili korisnik može sam unijeti podatke za izradu krivulje učinkovitosti po kojoj će program izabrati odgovarajući tip turbine. U bazi podataka programa se koriste standardni tipovi turbina : Pelton, Turgo, CrossFlow, Francis i Kaplan čije su karakteristike opisane u poglavlju [2.1.3].

2.2 Turbine selection



Slika 35. Odabir tipa turbine i prikaz krivulje učinkovitosti turbine

Odabir tipa turbine definira instalirani protok kroz turbinu i neto geodetski pad.

U sljedećem koraku [Slika 36] program definira snagu budućeg postrojenja i procjenjuje godišnju proizvodnju električne energije. Ulazni podaci potrebni za proračun su:

- Postotak učinkovitosti transformatora
- Postotak učinkovitosti generatora
- Postotak učinkovitosti prijenosa mehaničke energije

i kao dodatni podatak potrebno je unijeti postotak vremena zastoja turbine [uslijed prevelikog ili premalog vodostaja rijeke, održavanja...]



3. Energy



3.1 Characteristics of the plant

Plant name		LUŽANI
Location		BRODSKO-POSAVSKA ŽUPANIJA
River		ORLJAVA
Design discharge	[l/s]	9.462,4
Gross head	[m]	3,5
Turbine type		Pelton

3.2 Power

Turbine efficiency (Q_{design})	[%]	82%
Local losses	[m]	0,57
Maximum hydraulic loss	[%]	5,04%
Generator efficiency	[%]	97%
Transformer efficiency	[%]	98%
Gearbox efficiency	[%]	100%
Percentage of plant stop	[%]	5%
Maximum power	[kW]	211
Nominal power	[kW]	190
Average power	[kW]	131

Slika 36. Proračun maksimalne, nominalne i prosječne snage elektrane
 Program koristi sljedeću formulu za proračun snage:

$$P[t] = \frac{1}{1000} \times \gamma \times Q_{DER}(t) \times H_n(Q_{DER}(t)) \times \eta_{TUR}(Q_{DER}(t))$$

gdje je:

- $P[t]$ – snaga u zavisnosti o vremenu,
- $Q_{DER}[t]$ – instalirani protok kroz turbinu u zavisnosti o vremenu
- H_n – geodetska neto visina kao funkcija protoka kroz turbinu
- η_{TUR} – koeficijent učinkovitosti turbine
- γ – specifična težina vode

Za proračun godišnje proizvodnje električne energije program koristi formulu:

$$E_{ANNUAL} [MWh] = \frac{1}{1000} \times \eta_{TOT} \times (1 - f) \times \int_0^{8760} P(t) dt$$

gdje je:

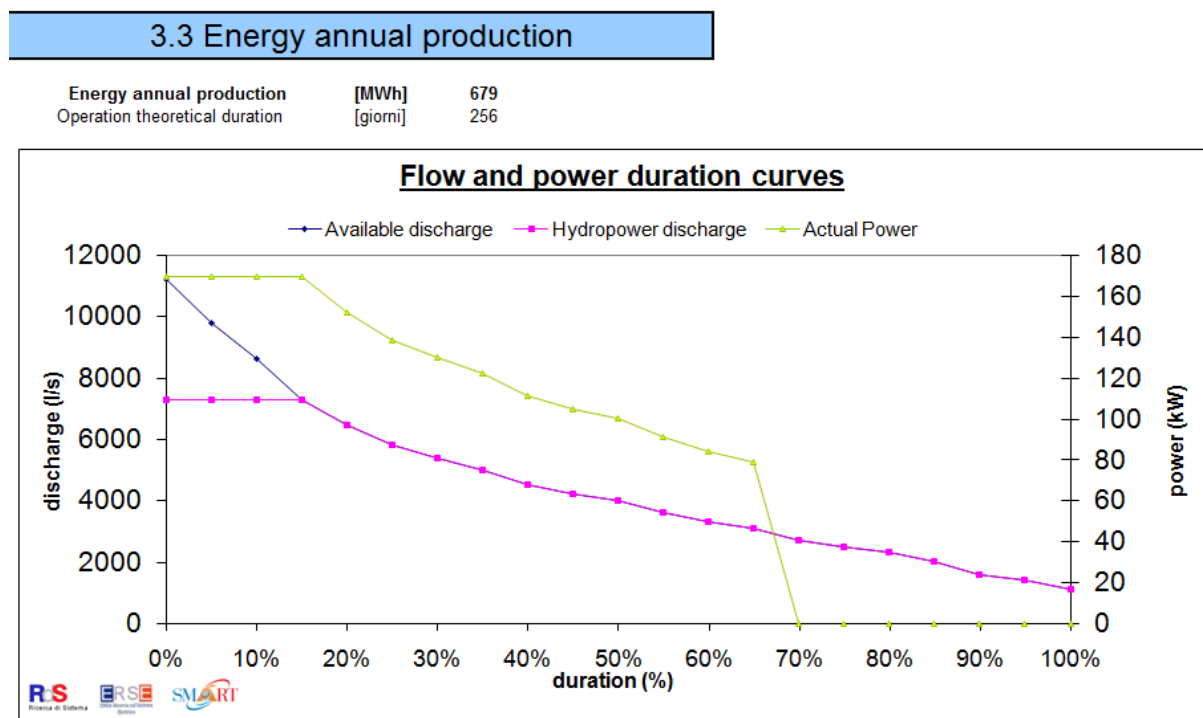
E_{ANNUAL} - godišnja proizvodnja električne energije

η_{TOT} - ukupni koeficijent učinkovitosti

$P[t]$ - maksimalna snaga turbine u ovisnosti o vremenu

Program prikazuje maksimalnu i nominalnu snagu elektrane te količinu godišnje proizvedene električne energije.


U idućem prikazu [Slika 37], prikazan je dijagram trajanja protoka i instalirane snage.




Slika 37. Dijagram trajanja protoka i snage za instalirani protok




Zadnji modul programa, [Slika 38], je modul procjene troškova postrojenja. Program proračunava sveukupne troškove izgradnje postrojenja koji uključuju građevinske radove, zahvate na vodotoku, troškove opreme i svih komponenti male hidroelektrane. Za slučaj da korisnik nema troškovnik radova i opreme odnosno ne zna točne cijene koštanja izgradnje postrojenja i cijene hidromehaničke i električne opreme, program preporučuje koristiti opciju „Formula“. Ova opcija koristi derivacijske jednadžbe pomoću kojih generira cijenu postrojenja na osnovu podataka spremljenih u bazu podataka. Važno je napomenuti da je prilikom proračuna tehno-ekonomske analize za lokaciju „Lužani“ u Brodsko-posavskoj županiji koristeći program Smart Mini-Idro isti proračunao cijenu koštanja izgradnje postrojenja u iznosu od 2.616.561€. To je puno veći iznos od onoga u tehno-ekonomskoj analizi rađenoj za istu lokaciju bez upotrebe računalnih programa. Razlog tome je činjenica da je Smart Mini-Idro talijanski program koji u svojoj bazi podataka koristi cijene gradnje i hidromehaničke te električne opreme sa talijanskog tržišta koje su prilično veće nego u Hrvatskoj. Isto tako program za svaku opciju izgradnje postrojenja koristi opciju izgradnje tlačnog cjevovoda za dovođenje vode turbini što je ujedno jedna od najskupljih stavki u proračunu izgradnje male hidroelektrane a za lokaciju Lužani nije predviđena izgradnja

tlačnog cjevovoda. Sve navedeno uveliko smanjuje cijenu koštanja izgradnje postrojenja te je realnija i točnija cijena iz prve tehno-ekonomske analize.



4. Costs



4.1 Investment estimate

Type of calculation:

☐ Synthetic estimate

☒ Formulas

intake costs (maximum discharge function)			
$C_P(€) = a \cdot Q(m^3/s)^2 + b \cdot Q(m^3/s) + c$	a	0.000002	
	b	84238.00	
	c	81318.00	
	Q	9.46	[m ³ /s]
	C _P	878.410	[€]
Channel costs (maximum discharge and length function)			
$C_{cA}(€/m) = a \cdot Q(m^3/s)^2 + b \cdot Q(m^3/s) + c$	a	-2.52	
	b	65.16	
	c	254.26	
	Q	9.46	[m ³ /s]
	L	2000.00	[m]
C _{cA}	#####	[€]	
Penstock costs (diameter and length function)			
$C_{cP}(€/m) = a \cdot D(m)^2 + b \cdot D(m) + c$	a	691.56	
	b	447.29	
	c	55.39	
	D	1.60	[m]
	L	15.00	[m]
C _{cP}	38.122	[€]	
Powerhouse costs (installed power function)			
$C_{cE}(€) = a \cdot P(kW)^2 + b \cdot P(kW) + c$	a	0.002400	
	b	782.52	
	c	#####	
	P	190	[kW]
	C _{cE}	410.051	[€]
TOTAL COST (€)		2.616.561	

Total Plant cost

2 616.561 [€]

National contribution

0% [%]

Capital Cost (€)

2.616.561

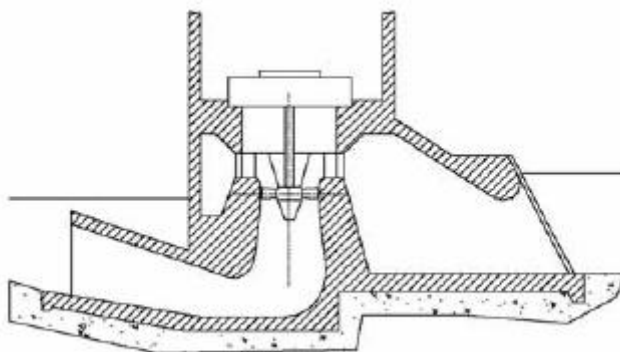
Slika 38. Prikaz procenjenih troškova

9. Inovacije u konstrukciji malih hidroelektrana

9.1. VLH turbine

VLH [very low head-„jako mali pad“] turbine su inovativni pristup rješavanju problema iskorištavanja hidropotencijala na vodotocima sa vrlo malim geodetskim padom između gornjeg i donjeg toka rijeke, ispod 3.2 m. Najveći problem kod lokacija sa malim geodetskim padom su veliki građevinski zahvati na lokaciji kako bi se voda od gornjeg toka usmjerila u kanal ili tlačni cjevovod i dovela turbini gdje se iskorištava kinetička energija vode, te je još potrebno konstruirati odvodni kanal od turbine koji često zbog smanjenja gubitaka energije zahtijeva ugradnju difuzora. U tom slučaju jednostavno nije ekonomično niti isplativo odlučiti graditi postrojenje na takvoj lokaciji. Za takve lokacije upravo je inovativni koncept VLH turbina rješenje koje takve lokacije može učiniti ekonomičnim i isplativim u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora.

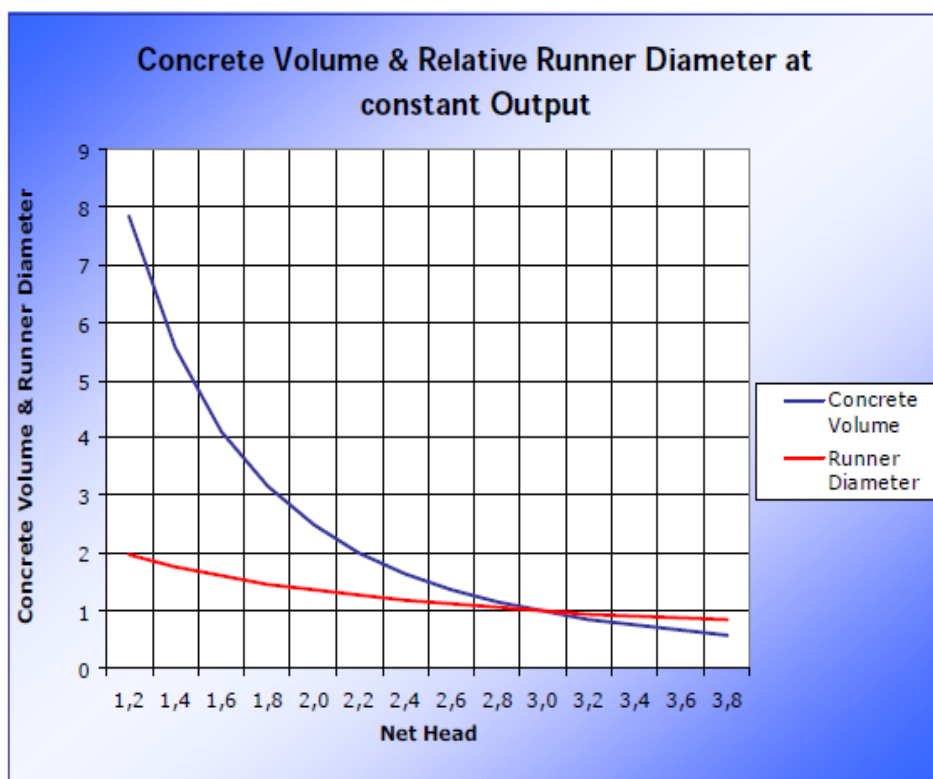
Konstrukcija VLH turbine je u suštini vrlo jednostavna. VLH turbina se sastoji od vertikalne Kaplan turbine [Slika 39] na koju je integriran generator i rešetke za sprečavanje ulaza smeća koje se same čiste. Svi elementi su integrirani u 1 sklop koji se ugrađuje u postojeću branu ili kanal. Vertikalna Kaplan turbina se sastoji od 8 podesivih lopatica, provodnog kanala u koji je smješteno 18 okretljivih vrata sa ravnim šipkama između koje služe kao pročišćivač, permanentnog magnetskog generatora direktno spojenog na kućište turbine i automatiziranog odstranjivača smeća smještenog u provodnom kanalu.



Slika 39. Shema vertikalne Kaplan turbine

Promjer Kaplan turbine je dosta velik [3.5-5.5m] što rezultira konstantno malom brzinom vode na ulazu i izlazu iz turbine što smanjuje gubitke energije. Također mala brzina vode kroz turbinu te na ulazu i izlazu čini VLH turbine pogodne za životinjski svijet u rijeci, odnosno primjenom VLH turbine na zahvatu nije potrebno graditi riblju stazu, koja je kod gradnje klasičnih postrojenja obavezna kako se ne bi ugrozio biološki život u rijeci.

Na [Slika 40] prikazan je odnos promjera turbine i volumena vode potrebnog za rad postrojenja u odnosu na geodetski pad. Kako bi se zadržala instalirana snaga smanjenjem geodetskog pada sa 3.2 m na 1.4 m potrebno je povećati volumen vode 5 puta a promjer turbine 2 puta.



Slika 40. Dijagram povećanja volumena i promjera

Zahvaljujući VLH turbinama i njihovoj jednostavnoj konstrukciji i visokom iskoristivošću [koeficijent učinkovitosti VLH turbina je 0.9] danas je moguće iskorištavanje hidropotencijala i na lokacijama na kojima je geodetski pad manji od 3 m. To je značajno jer postoji jako puno lokacija na rijekama u svim zemljama svijeta na kojima je geodetski pad manji od 3 m i do sada te lokacije nisu bile isplative za izgradnju malih hidroelektrana. Danas, primjenom koncepta VLH tehnologije te lokacije su postale zanimljive za ispitivanje hidropotencijala te će na mnogim lokacijama postati isplativo graditi male hidroelektrane što će rezultirati većim iskorištavanjem ovih obnovljivih izvora energije u svrhu proizvodnje električne energije.

10. Zaključak

U današnje vrijeme kada je potreba za energijom u svijetu u stalnom porastu, a raspoloživi resursi u obliku nafte i plina nestaju, proizvodnja energije iz obnovljivih izvora energije od iznimne je važnosti. Obnovljivi izvori energije imaju prednost pred tradicionalnim energentima naftom i plinom i jer ne zagađuju atmosferu te se proizvodnjom energije iz obnovljivih izvora uvelike smanjuje emisija plina CO₂ u atmosferu. To je ujedno i jedan od glavnih razloga zašto se danas u svijetu sve više potiče proizvodnja čiste energije, što je i regulirano sporazumom koji su donijeli Ujedinjeni narodi 1992.godine u Rio de Janeiru o smanjenju emisije CO₂ u atmosferu i povećanju energetske učinkovitosti. Samo velikim ulaganjem u obnovljive izvore energije će se uspjeti u realizaciji tog cilja. Energija vodotoka, sunca, vjetra, biomase i termalni izvori se sve više koriste u svrhu proizvodnje energije i veliki investitori ulažu ogroman novac u sve projekte vezane uz proizvodnju energije iz obnovljivih izvora. U Republici Hrvatskoj također postoji puno prijavljenih projekata vezanih za obnovljive izvore energije, a među najbrojnima su upravo projekti izgradnje malih hidroelektrana jedni od najbrojnijih. U Hrvatskoj postoji jako puno malih vodotoka koji su pogodni za izgradnju male hidroelektrane te će u budućnosti zasigurno imati veći udio u ukupnoj proizvodnji električne energije. Izradom detaljnih tehno-ekonomskih analiza potencijalnih lokacija za izgradnju male hidroelektrane eliminirati će se neisplative lokacije dok će za one isplative biti lakše proračunati njihov hidropotencijal i procijeniti moguću proizvodnju električne energije. Naročito primjenom sofisticiranih računalnih programa za izradu tehno-ekonomske analize koji se razvijaju će se olakšati izrada projektne dokumentacije izgradnje postrojenja i baze podataka hidropotencijala određenih regija. Izrada detaljnih baza podataka uz povezivanje administrativnih tijela od nivoa općine pa do državne razine i uključivanje potencijalnih investitora i školovanih stručnjaka u izradu strategije izgradnje postrojenja za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora omogućit će lakšu realizaciju projekata od izrade projektne dokumentacije do same izgradnje postrojenja. Obzirom na hidropotencijal kojim raspolaže Hrvatska u odnosu na potrošnju električne energije izgradnja svih potencijalnih postrojenja malih hidroelektrana imala bi značajan udio u proizvodnji energije iz obnovljivih izvora energije.

11. Literatura

- [1] Energetski institut „Hrvoje Požar“.: Program izgradnje malih hidroelektrana, Energetski institut „Hrvoje Požar“, Zagreb, 1998.
- [2] Layman-ov priručnik za male hidroelektrane., <http://pdfcast.org/pdf/layman-8217-s-guidebook-on-how-develop-a-small-hydro-site>
- [3] web:
http://www.etfos.hr/upload/OBAVIJESTI/obavijesti_diplomski/91424oie_3poglavlje_0809.pdf
- [4] Small Hydro Power Plants in Europe: CD Handbook on Methodologies and Tools; European S.M.A.R.T Program